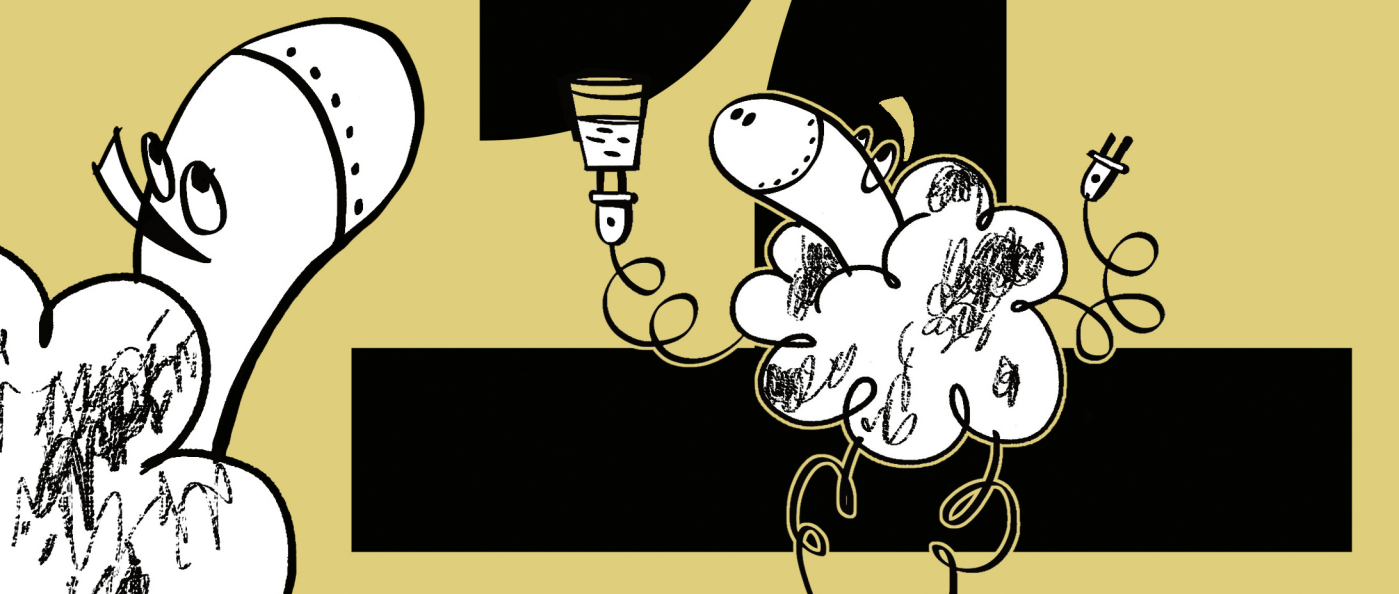
Сергей Марков

Охота на электроовец

Большая книга искусственного интеллекта

том

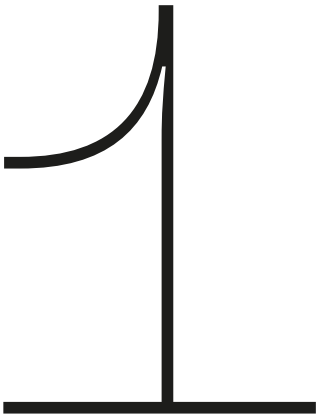


Охота на электроовец
Большая книга
искусственного
интеллекта

Сергей Марков

Охота на электроовец

Большая книга искусственного интеллекта



том

Москва
2024

УДК 004.8:004.9
ББК 16.6
М26

Марков С.
М26 Охота на электроовец. Большая книга искусственного интеллекта. — Москва, 2024. — 568 с. (1 том).

ISBN 978-5-6052656-1-0 (том 1)

Новый этап в области компьютерных технологий часто называют очередной «весной искусственного интеллекта». Её начало обычно отсчитывают с момента появления нейронной сети, сегодня известной под названием AlexNet, успех которой в распознавании зрительных образов возвестил о начале «революции глубокого обучения». В результате этой революции машинам удалось превзойти человеческий уровень при решении множества задач. Сегодня уже мало кого удивляют победы машин над сильнейшими игроками в го, создание ими музыки и картин, предсказание нейронными сетями пространственной структуры белков и другие вещи, которые десять лет назад мы посчитали бы чудесами. Алгоритмы искусственного интеллекта (ИИ) быстро вошли в нашу жизнь и стали её неотъемлемой частью. Например, каждый раз, когда вы делаете фотографию при помощи смартфона, её обработку выполняет нейронная сеть.

На смену весне искусственного интеллекта приходит лето. Эта книга рассказывает о том, какие события в истории науки привели к началу этого лета, о современных технологиях ИИ и их возможностях, а также пытается приоткрыть завесу, скрывающую от нас мир ближайшего будущего.

Мифы и заблуждения об искусственном интеллекте, страхи, насущные проблемы, перспективные направления исследований — обо всём этом вы узнаете из «Большой книги искусственного интеллекта».

УДК 004.8:004.9
ББК 16.6

16+

ISBN 978-5-6052656-1-0 (том 1)
ISBN 978-5-6052656-0-3 (оба тома)

© С. Марков, текст, 2024
© О. Добровольский, иллюстрации, 2024
© С. Кравецкая, А. Кравецкий, инфографика, 2024
© Артоника, макет, 2024

Оглавление

Предисловие 9

1 Договоримся об определениях 13

1.1 Понятие ИИ. Прикладной/слабый ИИ, сильный ИИ (AGI) 20
1.2 Тест Тьюринга, китайская комната Сёрля 22
1.3 Машинное обучение, его виды и области применения 29
1.3.1 Виды машинного обучения 31
1.3.2 Задачи, решаемые с помощью машинного обучения 33
1.3.3 Области применения машинного обучения 38

2 Сквозь тьму веков. История думающих машин 41

2.1 Древние счётные устройства и механизмы 45
2.1.1 Счёты, абак и астролябия 45
2.1.2 Антикитерский механизм 55
2.2 Неперовы палочки 69
2.3 Машина Шиккарда и паскалина 73
2.4 Машины Бэббиджа 78
2.4.1 Юность Бэббиджа. Проект де Прони как источник вдохновения 78
2.4.2 Доработка таблиц «Морского альманаха». Первая модель разностной машины 83
2.4.3 Развитие и проблемы проекта разностной машины 85
2.4.4 Последователи Бэббиджа: Георг Шутц и другие 89
2.4.5 Идеи Бэббиджа и их реализация 91
2.4.6 История перфокарт 93
2.4.7 Современники Бэббиджа — Ада Лавлейс и Луиджи Менабреа 99
2.4.8 Последние годы Бэббиджа и дальнейшая жизнь его идей 104
2.5 Табулятор Холлерита 109
2.6 Вершины механических вычислительных систем: военные баллистические вычислители 123
2.7 От электромеханических машин к ЭВМ 137
2.7.1 Конрад Цузе, создатель первого компьютера Z1 138
2.7.2 Говард Эйкен и компьютер Mark I 145
2.7.3 Кто же был первым? 149
2.7.4 Теоретики — Гёдель, Чёрч, Тьюринг 150
2.7.5 Забытый изобретатель Джон Винсент Атанасов 159
2.7.6 Взлом немецких военных шифров 167
2.7.7 Создатели советских ЭВМ — Сергей Лебедев и Исаак Брук 179

3 Машины, которые играют в игры, и игры, в которые играют машины ... 187

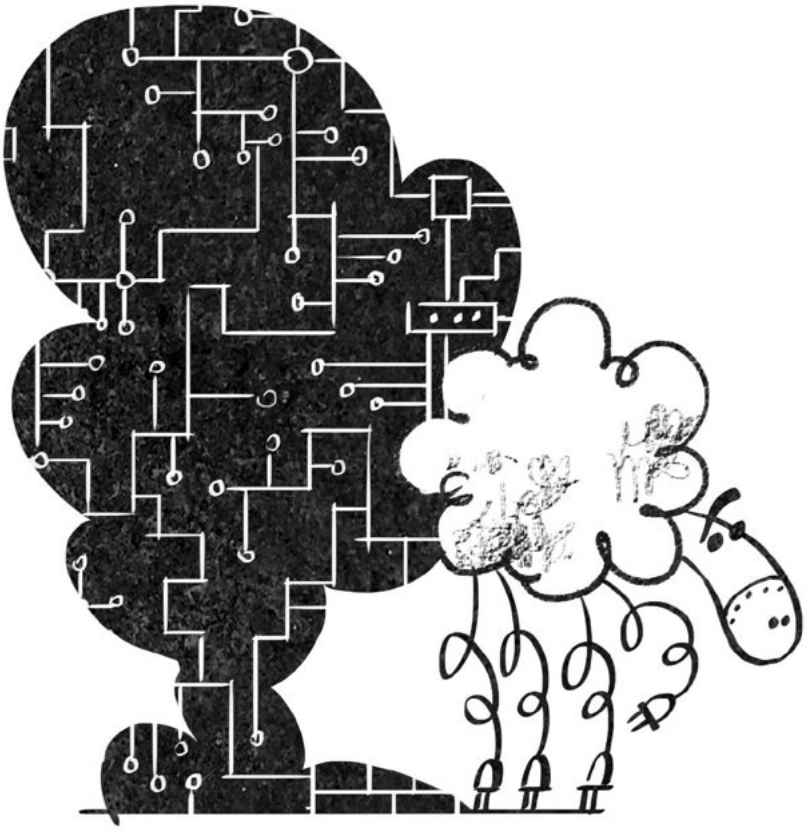
3.1 Ним и ниматрон ... 193
3.2 Крестики-нолики ... 198
3.3 Играть на уровне бога: от Цермело до «Ломоносова» (первое отступление) ... 205
3.3.1 Основоположник теории игр Эрнст Цермело ... 206
3.3.2 Метод обратной индукции ... 209
3.3.3 Применение обратной индукции для анализа шахматных окончаний ... 215
3.3.4 Виды решений: сильное, слабое, ультраслабое ... 220
3.3.5 Гекс — игра без ничьих ... 222
3.3.6 Решения разных игр ... 227
3.4 Шашки ... 229
3.4.1 Начало. Шашечная программа Кристофера Стрейчи ... 230
3.4.2 Продолжение. Шашечная программа Артура Сэмюэла ... 235
3.4.3 Дебют программы Chinook Джонатана Шеффера ... 242
3.4.4 Первый матч против чемпиона мира ... 249
3.4.5 Решающий матч ... 253
3.4.6 Нахождение слабого решения шашек ... 254
3.5 Шахматы ... 259
3.5.1 Шахматные автоматы и механизмы ... 259
3.5.2 Шахматные программы... без шахматных машин ... 267
3.5.3 Алекс Бернстайн и первая полноценная шахматная программа ... 272
3.5.4 СССР и США — творческая атмосфера созидания ... 278
3.5.5 Первые матчи шахматных программ и история «Каиссы» ... 283
3.5.6 Рассуждения о теоретической основе шахматного программирования и идеи Ботвинника ... 293
3.5.7 Прогресс в компьютерных шахматах в конце XX века ... 303
3.5.8 Появление и развитие проекта Фэнсюна Сюя ... 307
3.5.9 Первый матч против чемпиона мира ... 314
3.5.10 Второй матч против чемпиона мира ... 320
3.5.11 Компьютерные шахматы после Deep Blue ... 333
3.6 Грубая сила машины: отделяем правду от вымысла (второе отступление) ... 337
3.7 Го — новая цель ... 345
3.8 Итоги и перспективы ... 349

4 Нейронные сети и глубокое обучение 353

4.1 Бионика и история изучения мышления 355
4.2 Лягушки, мыши, кальмары, люди и другие животные в цепких руках нейрофизиологов 360
4.2.1 От экспериментов на животных до открытия нейронов 360
4.2.2 История исследований электрической активности мозга 365
4.2.3 Первые математические модели нейрона — Хорвег, Вейс и Лапик 372
4.2.4 Принцип «всё или ничего» — Лукас, Эдриан, Като 381
4.2.5 Два английских джентльмена и долгопёрый прибрежный кальмар 391
4.2.6 Мышонок Гарольд и его увлекательная жизнь после смерти 396
4.2.7 Коннектомика сегодня 399
4.3 История первой модели искусственного нейрона: Мак-Каллок и Питтс 406
4.3.1 Учёный, беспризорник и иммигрант 407
4.3.2 «Мы знаем, как мы знаем» 414
4.3.3 Удивительные приключения нейронных сетей в мире кибернетики: работа с Норбертом Винером 416
4.3.4 Научная богема и экспериментальная эпистемология 423
4.3.5 Грустный эпилог 427

4.4 Фрэнк Розенблатт, перцептрон, кот Тобермори и крысы 431
4.4.1 Наследие Мак-Каллока и Питтса 431
4.4.2 Развитие нейросетевых моделей 434
4.4.3 Исследования нейробиологов 438
4.4.4 Первые эксперименты в области искусственных нейронных сетей 441
4.4.5 Перцептрон Розенблатта 450
4.4.6 Первые нейрокомпьютеры 455
4.4.7 Нейросетевые исследования 1960-х годов 461
4.4.8 Теоретические результаты 464
4.4.9 Друзья, увлечения и крысы Розенблатта 467
4.5 «Чистюли» и «грязнули» — разные школы ИИ 472
4.6 Марвин Минский и зима искусственного интеллекта 477

Указатель 493
Источники 517



Предисловие

Отвечает пылкой дочке
Рассудительный Фердуси:
«На деревьях мёрзнут почки,
В облаках умолкли гуси,
Труд — глубокая криница,
Зачерпнул я влаги мало,
И алмазов на страницах
Лишь немного заблистало.
Не волнуйтесь, подождите,
Год я буду неустанным,
И тогда, кого хотите,
Назовёте вы желанным».

Дмитрий Кедрин. *Приданое*

Весной 2016 г. в Москве, в научно-популярной библиотеке «Научка» *, я прочитал свою первую научно-популярную лекцию под названием «Искусственный интеллект: история и перспективы». Аннотация этой лекции звучала следующим образом: *~~«Инженер М. С. Лось приглашает желающих лететь с ним 18 августа на планету Марс явиться для личных переговоров от 6 до 8 вечера. Ждановская набережная, дом 11, во дворе»~~ «Что объединяет древний Антикитерский механизм и суперкомпьютер Deep Blue? Действительно ли машины выигрывают у людей в шахматы благодаря феноменальным вычислительным способностям? Какие напитки употребляли изобретатели первой искусственной нейронной сети и какую роль сыграла поэзия в истории кибернетики? Скоро ли с конвейера сойдут первые машины, которым будет позволено убивать людей, и как мы будем жить в таком мире? Об этом и многом другом — на 48 слайдах за 128 минут. Из популярной лекции вы узнаете об истории и современном состоянии дел в области искусственного интеллекта».*

Причина, по которой специалист, занимающийся главным образом решением прикладных задач в области машинного обучения, решил забраться на табуретку и начать вещать *urbi et orbi* прописные истины, до банальности проста — у меня капитально подгорело из-за того, что в одной из научно-популярных лекций о прогрессе в области искусственного интеллекта я услышал

* Официально: Первая научно-популярная библиотека «Научка» (ГБУК г. Москвы ОКЦ ЦАО ЦДБ 14 «Научка»). — *Здесь и далее примечания автора.*

чудовищную чепуху о достижениях нейронных сетей в шахматах. Дело в том, что разработка систем искусственного интеллекта для игр много лет была одним из моих главных хобби, а в течение некоторого времени и работой. И хотя во второй половине 2000-х я постепенно перешёл от программирования игр к созданию систем для финансового сектора, шахматное программирование оставалось частью моих исследовательских интересов. В начале 2010-х гг. быстрый прогресс в области глубоких нейронных сетей стал причиной роста интереса общества к машинному обучению, и тут ВНЕЗАПНО специалистам открылась в самом что ни на есть выпуклом виде страшная истина: массовое сознание полно совершенно дремучих мифов и стереотипов об искусственном интеллекте. Путаница в понятиях, поверхностные однобокие и категоричные суждения, банальное незнание текущего положения дел в науке и технологиях, страхи и предубеждения, пустопорожняя трескотня недалёких маркетологов и «гениальных стартаперов», обещающих золотые горы, — всё это со скоростью взрыва заполняло пробелы в представлениях людей. И самым грустным для меня было то, что это происходит в минуты, когда технический прогресс формирует наше будущее, меняет привычные правила игры, определяет грядущий взлёт и упадок гигантских компаний и целых отраслей. Разруха в головах — явление чрезвычайно опасное, когда многим из этих голов предстоит завтра принимать решения, определяющие важнейшие направления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, решения о финансировании тех или иных проектов, о приоритетах образования и социальной политики. Наивно было бы полагать, что отдельные научно-популярные лекции или книги могут радикально изменить ситуацию, но в то же время ещё глупее было бы запереться в «башне из слоновой кости» и надеяться, что проблема решится сама собой.

Мне трудно однозначно определить жанр этой книги.

С одной стороны, я попытался провести читателя по извилистым тропам, проложенным наукой и технологиями в поисках святого Грааля искусственного интеллекта. Ведь изучение предмета в развитии позволяет лучше понять его внутренние взаимосвязи, глубже постичь природу явления. Мне кажется, что это хороший антидот против поспешных действий и однобоких суждений. Рассказывая об истории технологий искусственного интеллекта, я сделал акцент на решениях, принимавшихся ключевыми действующими лицами «на распутье», и на причинах этих решений. Меня интересовали не только сухие биографические факты и объективные условия, в которых приходилось действовать людям, вершившим технологическую историю человечества, но и особенности их характера, их ценности и жизненные приоритеты. Именно поэтому предметно-именной указатель в этой книге получился весьма объёмным.

С другой стороны, значительная часть книги посвящена современным достижениям в области машинного обучения — здесь вы найдёте описание многих современных исследований и ссылки на них, рассказ о лучших и перспективных моделях, численные оценки прогресса, достигнутого

в решении различных задач искусственного интеллекта. Также я постарался уделить внимание актуальным проблемам отрасли (как «распиаренным», так и известным лишь небольшому кругу специалистов) и намеченным путям их решения. Среди этих проблем не только технологические, но и социальные — ведь практически любые значимые достижения технологий приводят к видимым последствиям для общества, которые нельзя просто игнорировать.

Книга не требует от читателя какой-то особенной подготовки — бóльшая её часть будет хорошо понятна любому студенту или учащемуся старших классов общеобразовательной школы. По завету Стивена Хокинга я старался уменьшить число формул в книге, и, хотя их число не удалось сократить до нуля, вы не найдёте здесь ничего, что потребовало бы от читателя глубоких познаний в области вершин арифметики. В целом я попытался найти разумный баланс, который сделал бы книгу интересной совершенно разным людям: радикальным технарям и бескомпромиссным гуманитариям, управленцам и рядовым сотрудникам, молодым людям и убелённым сединами старцам. Не знаю, насколько хорошо мне удалось решить эту задачу и не было ли это фатальной ошибкой — ответ на этот вопрос может дать только время. Я очень надеюсь, мой дорогой читатель, что эта книга понравится лично вам. В любом случае я буду очень благодарен за любые отзывы, указания на неточности, различные замечания и предложения, которые помогут улучшить эту книгу в будущем. Их можно отправлять мне в виде сообщений в социальных сетях или по адресу моей личной электронной почты: sergei.markoff@gmail.com.

Приятного вам чтения!

Договоримся об определениях

> Узнал. Узнал, как обманчива бывает внешняя красота.
>
> Смотришь снаружи — вскормленные жёлтыми тюльпанами овцы.
>
> А удастся заглянуть глубже — ни жёлтых тюльпанов, ни пищеварительных органов, ни результатов пищеварения — одна лишь пугающая бездонная пустота.
>
> Денис Яцутко. *Табань!*

Причина многих ожесточённых и бесплодных споров с давних времён — в том, что спорщики, сами того не замечая, вкладывают в один и тот же термин совершенно разный смысл. Эталонным примером такой ситуации, наверное, можно назвать неутихающие более полувека споры об искусственном интеллекте.

Это понятие, появившись изначально в научной сфере среди специалистов, работавших в области вычислительной техники, довольно быстро просочилось в искусство и поп-культуру, где претерпело весьма причудливые изменения: сейчас представление случайно взятого человека об искусственном интеллекте, скорее всего, основано не на работах учёных, а на фильме «Терминатор».

Автор термина — Джон Маккарти, американский информатик (и, между прочим, изобретатель языка Lisp) — предложил его на границе 1955–1956 гг. Определение Маккарти звучало следующим образом: «Искусственный интеллект — наука и инженерная деятельность, направленная на создание умных [intelligent] машин»[1]. Как часто бывает, название дисциплины стали активно использовать и для обозначения её объекта, то есть самих «умных машин».

На первый взгляд, название, данное создателем, не слишком удачно: его проблема в том, что понятие «умный» само по себе требует определения. Но современникам Маккарти и участникам состоявшейся в 1956 г. первой в истории конференции по искусственному интеллекту всё было более или менее понятно. Дело в том, что исследования в этой области начались задолго до того, как термин появился в его современном виде. В 1950 г. увидела свет статья Алана Тьюринга «Вычислительные машины и разум» (Computing Machinery and Intelligence), содержащая первый детальный анализ вопроса о том, могут ли машины думать. Тремя годами ранее датирована первая дошедшая до нас работа Тьюринга, в которой упоминается «машинный интеллект» [machine intelligence], а вообще, по мнению некоторых исследователей, Тьюринг начал заниматься этим вопросом ещё в 1941 г.[2]

1

Договоримся об определениях

Стюарт Рассел и Питер Норвиг в классической работе «Искусственный интеллект: современный подход» (Artificial Intelligence: A Modern Approach)[3] классифицируют определения искусственного интеллекта исходя из того, на каких свойствах разрабатываемых систем сделан акцент: на действиях [acting] систем или на воплощённых в них принципах рассуждения [thinking]. Это позволяет Расселу и Норвигу разбить все определения искусственного интеллекта на две группы. Далее, внутри каждой группы, может быть сделан акцент на характере действий (или рассуждений) систем — рациональном [rationally] или человекоподобном [humanly]. Таким образом, Рассел и Норвиг выделяют четыре группы определений. Однако, если приглядеться к приведённым ими примерам из трёх разных групп (*«[Автоматизация] действий, которые мы ассоциируем с мыслительным процессом у людей...»*[4], *«Изучение вопроса о том, как научить компьютеры делать вещи, которые в настоящее время лучше даются людям»*, *«Изучение принципов вычислений, которые могут сделать возможным восприятие, рассуждение и действие»*[5]), можно обнаружить, что они сходятся в одном: искусственный интеллект — это дисциплина, ставящая своей целью создание систем, способных решать интеллектуальные задачи, то есть такие задачи, которые люди традиционно решают при помощи собственного интеллекта. Как выразился Реймонд Курцвейл: *«Искусство создания машин, выполняющих функции, требующие интеллекта в случаях, когда их выполняют люди»*[6]. Некоторые авторы не могут остановиться на этом и вступают на скользкую дорогу перечисления: *«[Автоматизация] действий, которые мы ассоциируем с мыслительным процессом у людей, таких как принятие решений, решение задач, обучение...»*[7]

Разумной альтернативой сложившейся практике определения понятия искусственного интеллекта кажется попытка определения понятия «интеллект», но этот подход по сути представляет собой попытку построения множества, основанную лишь на одном бесспорно установленном элементе — человеческом интеллекте. Неясно, какие именно его признаки являются критически важными для того, чтобы приписать наличие интеллекта объекту, не являющемуся человеком. Способность обучаться, наличие сознания?..

Ответы на эти вопросы пытается дать стоящий некоторым особняком от других агентно-ориентированный подход, в основе которого лежит не понятие интеллектуальной задачи, а понятие интеллектуального или рационального агента: *«интеллектуальный агент — любое устройство, которое воспринимает своё окружение и осуществляет действия, максимизирующие шансы успешного достижения его целей»*, а *«вычислительный интеллект (computational intelligence)* (синоним понятия „искусственный интеллект“. — *С. М.*) *— изучение принципов создания интеллектуальных агентов»*[8]. Или вот как это сформулировано у Рассела и Норвига: *«Агент — это просто нечто, что осуществляет действия (слово происходит от лат. agere, что значит делать). Конечно, все компьютерные программы выполняют какие-то действия, но вычислительные агенты делают большее: оперируют автономно, воспринимают своё окружение, существуют в течение длительного промежутка*

времени, адаптируются к изменениям, ставят и преследуют цели. Рациональный агент — нечто (некто), что (кто) действует для достижения наилучшего результата или, при наличии неопределённости, наилучшего ожидаемого результата»[9]. Вот что такое агент, а вовсе не умничающий Хьюго Уивинг * в чёрных очках и костюме офисного работника.

В общем, сторонники стоящего немного особняком агентно-ориентированного подхода, по сути, выделяют следующие необходимые свойства объекта, обладающего интеллектом: наличие восприятия, наличие целей, способность действовать рационально, то есть выполнять действия, способствующие достижению цели. Рассел и Норвиг добавляют ещё несколько качеств: способность адаптироваться, длительное существование. Лично я против подобных дополнений, так как они, по-моему, лишь увеличивают неопределённость. Начиная с какой секунды жизни начинается «длительное существование»? Можно ли сказать, что запорожец, въехавший под БелАЗ, в некотором роде адаптировался, изменив форму кузова?

Легко заметить, что определение интеллекта, неявно данное сторонниками агентно-ориентированного подхода, описывает нечто существенно более широкое, чем человеческий интеллект. Если бы животные или даже растения были компьютерными программами, мы неизбежно должны были бы отнести их к области искусственного интеллекта.

Как мне кажется, агентно-ориентированный подход делает понятие искусственного интеллекта ещё более неопределённым, поэтому в книге я буду придерживаться более классического определения: искусственный интеллект (далее — ИИ, AI, Artificial Intelligence) — область науки и технологии, занимающаяся автоматизацией решения интеллектуальных задач. При этом я осознанно принимаю риск того, что в отношении некоторых задач степень их интеллектуальности может вызывать споры, однако полезность этих споров, на мой взгляд, не превышает полезности приписываемых средневековым схоластам споров о том, сколько ангелов может поместиться на кончике швейной иглы. По мере того как машины справляются со всё большим и большим количеством интеллектуальных задач, общепринятое представление о том, что относится, а что не относится к последним, постепенно меняется. В конце концов, сложение и вычитание чисел в уме человек тоже осуществляет при помощи собственного интеллекта, и ещё 300–400 лет назад машина, способная выполнять арифметические операции, была настоящим чудом техники. Сегодня же этим уже никого не удивишь. В 1960-е мы мечтали о машинах, способных выигрывать у сильнейших шахматных игроков, и если в те времена вы бы спросили обывателя: является ли системой искусственного интеллекта машина, способная выиграть в шахматы у чемпиона мира, то почти наверняка получили бы утвердительный ответ. Сегодня многие люди лишь брезгливо поморщатся при упоминании шахматных программ: подумаешь, не очень-то это интеллект, просто быстрый перебор

* Исполнитель роли агента Смита в фильме «Матрица» (1999).

вариантов! Несколько лет назад к этой тираде, весьма вероятно, добавилось бы рассуждение об игре го: вот когда машины смогут обыграть чемпиона мира по го, тогда и посмотрим! Интересно будет понаблюдать за тем, какая из сложных интеллектуальных задач теперь, после успехов AlphaGo и AlphaZero, займёт в массовом сознании место достойной истинного ИИ.

Это явление массового сознания с лёгкой руки писательницы и специалистки по истории ИИ Памелы Маккордак получило наименование «эффект ИИ».

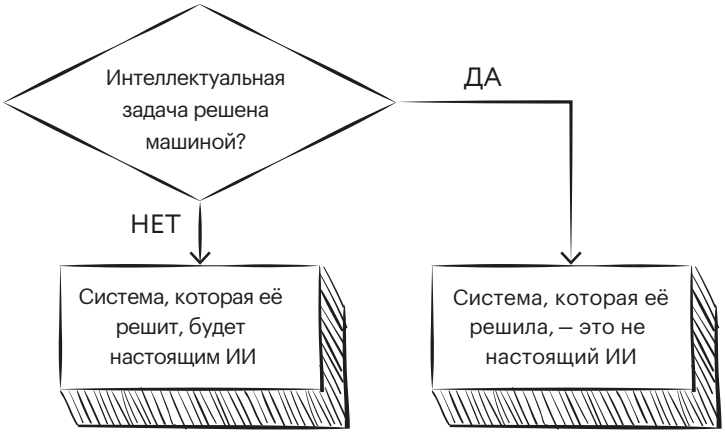


Рис. 1. Эффект ИИ

«...Каждый раз, когда кто-то находил способ научить компьютер что-то делать — хорошо играть в шашки, решать простые, но относительно неформальные задачи, — раздавался хор критиков, заявлявших, что это не мышление», — пишет Маккордак. То есть некоторые люди полагают, что, как только ИИ успешно решает ту или иную задачу, она тут же перестаёт относиться к области ИИ. Маккордак называет «странным парадоксом» тот факт, что *«практические успехи ИИ, программы, которые достигали разумного поведения, быстро входили в состав прикладных областей, где они оказывались полезными, становились молчаливыми помощниками наряду с другими подходами к решению задач, оставляя исследователей в области ИИ в компании одних лишь „неудач“, крепких орешков, которые ещё не удалось расколоть»*[10].

Как говорит австралийский робототехник и исследователь ИИ Родни Брукс: *«Каждый раз, когда мы понимаем что-либо, оно перестаёт быть магией, и мы говорим: „О, это просто вычисление“»*[11]. Ларри Теслеру приписывают изобретение «теоремы Теслера»: *«ИИ — это то, что ещё не создано»* [Artificial Intelligence is whatever hasn't been done yet][12]. Впрочем, сам Теслер утверждает, что это неточная цитата. В действительности он говорил, что *«интеллект — это всё то, что машины пока не умеют делать»* (Intelligence is whatever machines haven't done yet)[13]. Так или иначе, следует признать

мудрость человека, который подарил человечеству клавиатурные сочетания Ctrl + C и Ctrl + V.

Похожая ситуация, как мне кажется, наблюдается и в других дисциплинах. Например, никто всерьёз не назовёт человека, освоившего правило сложения в столбик и способного доказать на школьной доске теорему Пифагора, математиком, хотя арифметика и планиметрия по-прежнему остаются разделами математики и вряд ли это когда-нибудь изменится. А в отношении постоянного роста требований к ИИ я не могу удержаться от цитаты из монолога американского комика Луи Си Кея: *«Люди жалуются на задержки вылетов. Из Нью-Йорка в Калифорнию — пять часов пути. Когда-то это занимало 30 лет. По дороге кто-то умер бы, а кто-то родился. На место прибыла бы совершенно другая группа людей. Сейчас ты посмотришь кино, сходишь на горшок — и уже дома»*.

1.1 Понятие ИИ. Прикладной/слабый ИИ, сильный ИИ (AGI)

В силу того, что искусственный интеллект — понятие чрезвычайно широкое, возникли термины для конкретизации того, с каким именно явлением мы имеем дело. Сегодня традиционным стало разделение систем ИИ на два вида. Первый из них — «слабый» [weak], «специализированный» [narrow] или «прикладной» [applied], то есть предназначенный для решения какой-то одной, отдельной интеллектуальной задачи или их небольшого множества. Второй вид — «сильный» [strong] или «универсальный» [general] ИИ, к нему относят гипотетические системы, способные, подобно человеческому интеллекту, решать неопределённо широкий спектр интеллектуальных задач.

Интересно, что изначально термин «сильный искусственный интеллект» (strong AI) означал не совсем то, что часто означает сегодня. Его автор, философ Джон Сёрль, ввёл его для того, чтобы отличать систему, которая *«ведёт себя так, как будто является разумной»* [can (only) act like it thinks and has a mind], от системы, которая «на самом деле» обладает разумом [can think and have a mind][14]. В современных работах понятия «сильный ИИ» и «гипотеза сильного ИИ» иногда используют в оригинальном, сёрлевском смысле, но ряд исследователей, к которым относится, например, уже упоминавшийся Реймонд Курцвейл, считают, что термин «сильный ИИ» описывает любую систему ИИ, которая действует так, как будто обладает разумом, вне зависимости от того, способны ли философы определить, «в самом ли деле» она им обладает[15].

Для того чтобы не допускать путаницы и разночтений, многие исследователи предпочитают использовать термин *artificial general intelligence* (общий/универсальный искусственный интеллект), обычно его употребляют в виде аббревиатуры — AGI.

Занятно, что впервые термин появился в работе Марка Губруда «Нанотехнологии и международная безопасность», посвящённой военным применениям технологий будущего. Автор даёт AGI следующее определение: *«Под продвинутым универсальным ИИ я понимаю системы ИИ, способные соперничать с человеческим мозгом или превосходить его в сложности и скорости, которые способны получать общие сведения, манипулировать ими и выстраивать рассуждения и которые могут использоваться, по сути, в любой фазе индустриальных или военных операций, в которой был бы необходим человеческий*

1.1

Понятие ИИ. Прикладной/слабый ИИ, сильный ИИ (AGI)

интеллект. Эти системы могут быть основаны на моделировании человеческого мозга, но это не является необходимым требованием, они не должны также обязательно обладать „сознанием“ или любой другой компетенцией, не имеющей прямого отношения к их применению. Что важно, так это то, что эти системы могут быть использованы для замены человеческих мозгов в задачах, начиная от организации и запуска шахты или фабрики и заканчивая пилотированием самолёта, анализом разведданных или планированием боевых действий»[16]. Сейчас AGI определяют обычно несколько проще: *«AGI — искусственный интеллект, способный успешно выполнить любую интеллектуальную задачу, посильную для человека»*[17].

1.2 Тест Тьюринга, китайская комната Сёрля

В конце 30-х гг. прошлого века, ещё до того, как были созданы первые электронные вычислительные машины, вопросами потенциальной «разумности» машин стали задаваться люди, формально далёкие от компьютерных наук. Если нечто выглядит как кошка, мяукает как кошка, ведёт себя как кошка, в любом эксперименте проявляет себя как кошка, то, наверное, это кошка. Этот подход использовал Альфред Айер — английский философ-неопозитивист, представитель аналитической философии. В книге «Язык, истина и логика» (Language, Truth and Logic, 1936) он предложил алгоритм распознавания разумного человека и неразумной машины: *«Единственным основанием, на котором я могу утверждать, что объект, который кажется разумным, на самом деле не разумное существо, а просто глупая машина, является то, что он не может пройти один из эмпирических тестов, согласно которым определяется наличие или отсутствие сознания»*[18]. Впрочем, Айер, будучи философом, наверняка был в курсе остроумного замечания Дидро: *«Если удастся найти попугая, способного ответить на любой вопрос, я не раздумывая признаю его разумным»*[19].

Доподлинно неизвестно, был ли Алан Тьюринг знаком с трудами Айера или Дидро, но именно он вошёл в историю в качестве автора конкретной процедуры для определения способности машины мыслить. Сегодня она известна нам под названием «тест Тьюринга».

В работе «Вычислительные машины и разум» (1950) Тьюринг пишет:

Эта новая форма проблемы может быть описана с помощью игры, которую мы назовём «игрой в имитацию». В этой игре участвуют три человека: мужчина (A), женщина (B) и кто-нибудь, задающий вопросы (C), которым может быть лицо любого пола. Задающий вопросы отделён от двух других участников игры стенами комнаты, в которой он находится. Цель игры для задающего вопросы состоит в том, чтобы определить, кто из двух других участников игры является мужчиной (A), а кто — женщиной (B). Он знает их под обозначениями X и Y и в конце игры говорит либо: «X есть A, и Y есть B», либо: «X есть B, и Y есть A». Ему разрешается задавать вопросы такого, например, рода: C: «Попрошу X сообщить мне длину его (или её) волос». Допустим теперь, что в действительности X есть A. В таком случае A и должен давать ответ. Для A цель игры состоит в том, чтобы побудить C прийти к неверному заключению. Поэтому его ответ может быть, например, таким: «Мои волосы коротко острижены, а самые длинные пряди имеют около девяти дюймов

1.2

Тест Тьюринга, китайская комната Сёрля

в длину». Чтобы задающий вопросы не мог определить по голосу, кто из двух других участников игры мужчина, а кто — женщина, ответы на вопросы следовало бы давать в письменном виде или, ещё лучше, печатать на машинке. Идеальным случаем было бы телеграфное сообщение между комнатами, где находятся участники игры. Если же этого сделать нельзя, то ответы и вопросы может передавать какой-нибудь посредник. Цель игры для третьего игрока — женщины (B) — состоит в том, чтобы помочь задающему вопросы. Для неё, вероятно, лучшая стратегия — давать правдивые ответы. Она также может делать такие замечания, как: «Женщина — я, не слушайте его!», но этим она ничего не достигнет, так как мужчина тоже может делать подобные замечания. Поставим теперь вопрос: «Что произойдёт, если в этой игре вместо A будет участвовать машина?» Будет ли в этом случае задающий вопросы ошибаться столь же часто, как и в игре, где участниками являются только люди? Эти вопросы и заменят наш первоначальный вопрос «могут ли машины мыслить?»[20].

В некоторых источниках сообщается, что в основу процедуры, предложенной Тьюрингом, легла салонная «игра в имитацию», популярная в Викторианскую эпоху[21] и известная Тьюрингу с юности[22] (оставим здесь за скобками тот факт, что юность Тьюринга более чем на два десятилетия отстояла от Викторианской эпохи, — в конце концов, почему бы юношам в 1920-е не играть в некоторые викторианские игры?). В других источниках «игра в имитацию» упоминается просто как популярное времяпрепровождение на вечеринках[23]. Мне, однако, не удалось обнаружить ни одного упоминания подобной игры вне связи с тестом Тьюринга. Молодёжь Викторианской эпохи, конечно, знала толк в изощрённых забавах, иногда требовавших продемонстрировать искусство имитации. Например, при игре в «Придворные» (The Courtiers) один из гостей, выбранный королём или королевой, садился в центре комнаты, а остальные, исполнявшие роли придворных, должны были имитировать все его действия, сохраняя серьёзные лица. Если придворный улыбался или начинал смеяться, он выбывал из игры и должен был выполнить фант. Последний из гостей, продемонстрировавший наибольшую выдержку, становился новым монархом. Использование подобной процедуры в научных исследованиях, конечно, могло бы серьёзно разнообразить работу учёных, но, боюсь, надежд на это пока что немного.

Итак, Тьюринг предлагает игру с анонимным участником, который может быть либо машиной, либо человеком: взаимодействие осуществляется посредством телетайпа или любого иного способа, придающего сообщениям обезличенную форму. Тест считается успешно пройденным в случае, если машине удалось выдать себя за человека.

Отметим важную особенность теста Тьюринга: он предлагает чисто поведенческий критерий наличия интеллекта, не требующий анализа внутреннего строения объекта. Тьюринг отмечает, что мы приписываем интеллект другим людям, пользуясь именно этим критерием, ведь мы никак не можем залезть в сознание другого человека.

Тьюринг решительно отстаивает идею о том, что не существует принципиально непреодолимых препятствий на пути создания машины, способной пройти его тест, он последовательно приводит и опровергает девять аргументов против возможности создания такого искусственного интеллекта.

Вокруг теста Тьюринга, несмотря на прозрачность предложенного автором подхода, существует изрядное количество путаницы. Виноват в этом отчасти и сам Тьюринг, который в своей работе, по сути дела, описывает две несколько отличающиеся друг от друга процедуры. Кроме того, в 1951 г. в передаче на радио Би-би-си (BBC, British Broadcasting Corporation, Британская вещательная корпорация) Тьюринг предлагает третью формулировку теста[24].

Итак, путаница начинается со статьи 1950 г., в которой Тьюринг сначала описывает игру, в которой участвует женщина, пытающаяся своими ответами помочь задающему вопросы, а также мужчина, стремящийся выдать себя за женщину. Далее Тьюринг рассматривает возможность замены мужчины на машину. Получающаяся в результате процедура сегодня носит наименование «Оригинальный тест игры в имитацию» (Original Imitation Game Test, или сокращённо OIG).

В конце V части статьи Тьюринг ВНЕЗАПНО даёт несколько отличающееся описание процедуры: *«Если взять только одну конкретную цифровую вычислительную машину Ц, то спрашивается: справедливо ли утверждение о том, что, изменяя ёмкость памяти этой машины, увеличивая скорость её действия и снабжая её подходящей программой, можно заставить Ц удовлетворительно исполнять роль А в „игре в имитацию“ (причём роль В будет исполнять человек [man])?»*

Лёгким движением руки «женщина» превратилась в «мужчину» или даже в «человека» вообще, как разумно предполагает переводчик на русский язык. Если мы согласимся с переводчиком, то полученный вариант процедуры (в котором машина стремится выдать себя за человека, а не за конкретно женщину, в то время как человек В старается помочь задающему вопросы) будет называться стандартным тестом Тьюринга (Standard Turing Test, STT). Конечно, возможна альтернативная интерпретация, в которой на месте женщины в игре оказывается мужчина А из оригинальной игры в имитацию, стремящийся, как и машина, выдать себя за женщину. В таком случае машина и мужчина будут соревноваться в искусстве выдачи себя за другого перед лицом задающего вопросы[25].

Из записи радиопередачи 1951 г. становится ясно, что Тьюринг всё-таки не делал различия между словами *man* и *human*. Версия теста, предложенная радиослушателям, по сути дела, повторяет STT с той лишь разницей, что на место человека, задающего вопросы, приходит жюри и целью машины становится обмануть существенную долю его участников.

Отдельный важный вопрос практической организации тестирования состоит в том, должен ли задающий вопросы знать, что один из его собеседников — машина. В оригинальном описании теста ничего не говорится об этом, а современные исследовательские стандарты предполагают использование

в подобных экспериментах контроля и двойного слепого метода*. Словом, сегодня валидным вариантом теста Тьюринга считается версия STT с жюри, контрольной группой и двойным слепым методом проведения испытаний.

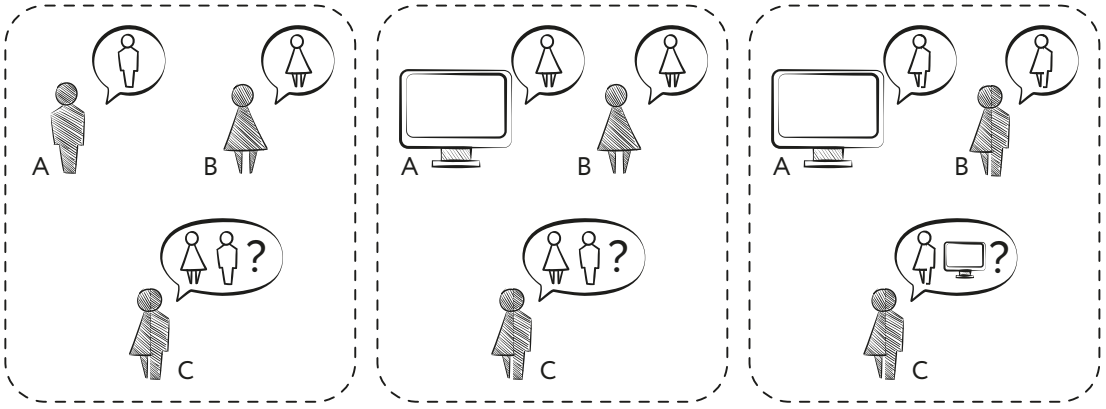
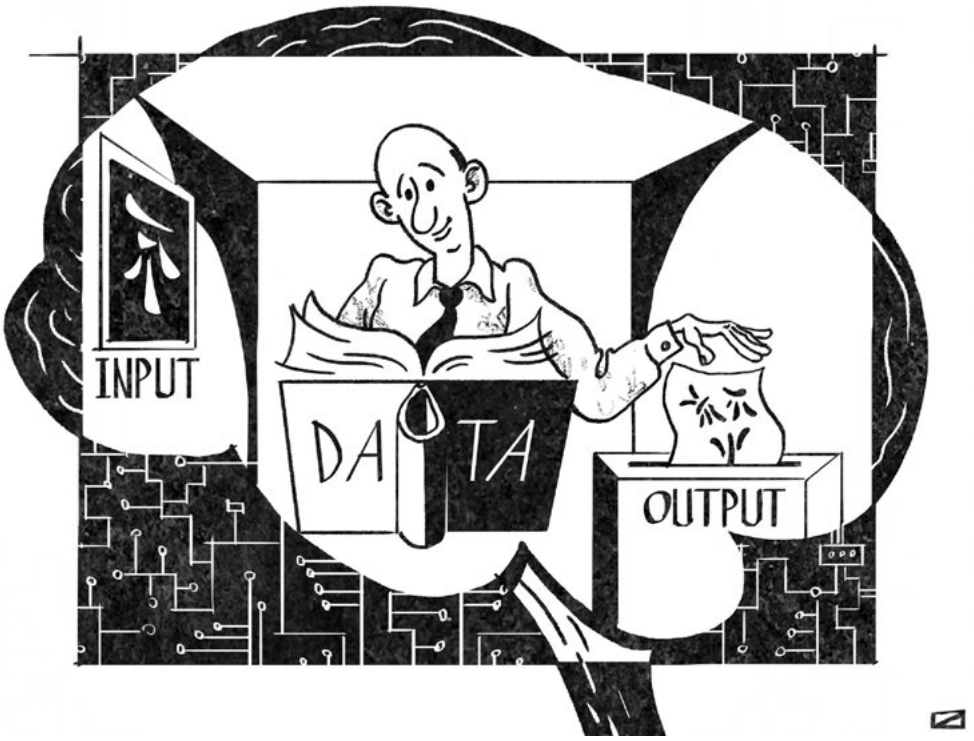


Рис. 2. Игра в имитацию и две различные версии теста Тьюринга из статьи 1950 г.

Наверное, самым известным возражением на предложенную Тьюрингом процедуру стал ответ философа Джона Сёрля, который предложил мысленный эксперимент, получивший название «китайской комнаты». Представим себе закрытую комнату, в которую передают вопросы, написанные на китайском языке, и из которой получают ответы, опять же написанные на китайском. В комнате находится человек, не говорящий по-китайски (для простоты далее будем считать, что это сам Джон Сёрль), который понимает английский язык и использует набор правил, написанных по-английски, с китайскими иероглифами, предназначенными для записи ответов. Таким образом, человек, пишущий вопросы по-китайски и получающий из комнаты ответы, может сделать вывод, что внутри комнаты находится некто, способный понимать китайский язык. Но, по условию задачи, это не так. Следовательно, процедура, построенная только на изучении коммуникативного поведения объекта, подобная тесту Тьюринга, приводит нас к неправильному умозаключению.

Вокруг аргумента Сёрля развернулась весьма масштабная полемика, различные нюансы которой весьма детально разобраны в статьях Пола Кокшотта «Бёттке, синтаксис и тест Тьюринга» (Boettke, Syntax and the Turing Test)[26] и Лоуренса Ландау «Философская ошибка Пенроуза» (Penrose's Philosophical Error)[27]. Здесь мы рассмотрим только два из основных аргументов против мысленного эксперимента Сёрля.

* Двойной слепой метод — подход, когда ни задающий вопросы, ни взаимодействующие с ним организаторы сами не знают, кто из участников теста является машиной и есть ли вообще машина среди участников теста; то есть задача для жюри должна быть сформулирована следующим образом: «Выберите один из вариантов: только испытуемый 1 является машиной, только испытуемый 2 является машиной, оба испытуемых являются машинами, оба испытуемых являются людьми».



Первый и наиболее известный из них получил название «системный аргумент». Он сводится к тому, что даже если сам Сёрль, в соответствии с условиями эксперимента, не понимает китайский язык, тем не менее систему, состоящую из набора правил и самого Сёрля, вполне можно охарактеризовать как понимающую китайский. Если мы посмотрим на человеческий мозг, то легко заметим, что он состоит из различных элементов. Можно ли считать, что каждая взятая по отдельности часть мозга разумна? Разумны ли взятые порознь отделы мозга? Нейроны? Атомы углерода?

Суть второго популярного возражения, аргумента «другие умы», состоит в следующем: если вы отказываете китайской комнате в понимании языка, то вы не можете быть уверенными в том, что кто-то, кроме вас, вообще что-то понимает, поскольку всё, с чем вы имеете дело, — это только поведение других людей.

В целом аргументы Сёрля и его сторонников, например Роджера Пенроуза, вызывают ассоциации с витализмом, то есть учением о наличии в живых организмах нематериальной сверхъестественной силы, управляющей жизненными явлениями, — «жизненной силы» (лат. *vis vitalis*) («души», «энтелехии», «археи» и проч.). Теория витализма постулирует, что процессы в биологических организмах зависят от этой силы и не могут быть объяснены с точки зрения физики, химии или биохимии. Когда-то виталисты утверждали, что органическую материю нельзя получить из неорганической. Затем, по мере прогресса в химии, границы «невозможного» постепенно стали

1.2

Тест Тьюринга, китайская комната Сёрля

сдвигаться, теперь уже невозможным объявлялось создание сложных органических соединений, а после успешного освоения их синтеза — создание живого организма. Теперь очередным «непреодолимым» рубежом стал человеческий разум, при этом роль жизненной силы у Сёрля выполняет «каузальная мощь человеческого мозга» *, а у Пенроуза — квантовая природа сознания **[, 28].

Велико ли значение теста Тьюринга в наши дни? С одной стороны, искусственный интеллект, способный пройти тест Тьюринга или по крайней мере приблизиться к его прохождению, должен демонстрировать решение важных практических задач: понимание естественного языка и умение производить произвольные рассуждения. С другой стороны, некоторые современные исследователи в области искусственного интеллекта считают, что сегодня попытки создания системы для прохождения теста Тьюринга — это лишь отвлечение внимания от более плодотворных направлений исследований[29]. Действительно, тест Тьюринга не является сегодня областью, популярной в рамках академических или коммерческих проектов. Рассуждая о причинах такого положения дел, Рассел и Норвиг приводят забавную аналогию с историей создания самолёта: *«В инженерных текстах по авиационной технике,* — пишут они, — *нигде не говорится о том, что целью этой области является „создание машин, способных летать подобно голубям настолько, чтобы они могли обмануть других голубей“»*[30].

Сегодня тест Тьюринга относят к группе так называемых ИИ-полных (AI-complete) задач, то есть таких задач, сложность которых делает их решение эквивалентным созданию AGI[31]. К таким задачам обычно относят задачу понимания естественного языка, машинный перевод, решение тестов Бонгарда *** и тому подобное. Важно заметить, что ИИ-полнота — неформальный термин, так как строгого доказательства необходимости AGI для решения всех этих задач пока что не существует.

Тьюринг стремился дать чёткий и понятный пример, необходимый в дискуссии о философии искусственного интеллекта. Как заметил Джон Маккарти: *«Маловероятно, что [философия ИИ] окажет больший эффект на практические исследования в области ИИ, чем философия науки в целом — на саму науку»*[32].

Впрочем, некоторое отношение к современной практике тест Тьюринга всё-таки имеет, в одном из хорошо всем известных вариантов. Наверняка вам не раз приходилось вводить цифры или буквы с картинок, чтобы доказать, что вы не робот. Подобного рода тесты получили название «ка́пча» ****. В 2013 г. каждый день пользователям во всём мире приходилось про-

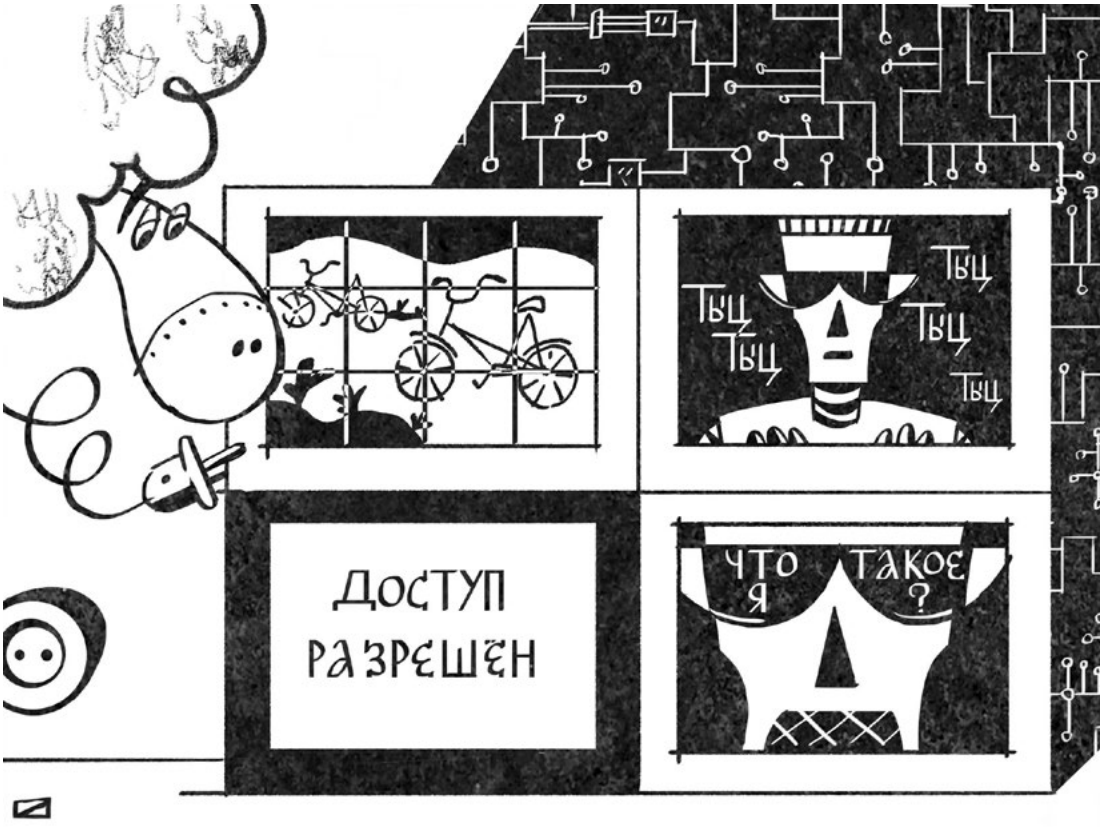
* Способность мозга находить причинно-следственные связи.

** Представление о том, что в основе разума лежат квантовомеханические эффекты, принципиально невоспроизводимые средствами классической механики.

*** Наборы визуальных тестов для оценки способности системы находить простые закономерности, предложенные советским учёным Михаилом Бонгардом.

**** CAPTCHA (Completely Automated Public Turing test to tell Computers and Humans Apart) — полностью автоматизированный публичный тест Тьюринга для различения компьютеров и людей.

ходить подобные тесты примерно 320 млн раз[33]. Старт этому масштабному противостоянию снаряда и брони был дан в 1997 г.[34], и с тех пор тесты постоянно приходится усложнять из-за появления всё новых и новых систем ИИ, способных справиться с их прохождением. Позже мы ещё несколько раз вернёмся к тесту Тьюринга — например, когда будем обсуждать прогресс в области обработки машинами естественного языка, а сейчас перейдём к не менее животрепещущей теме — машинному обучению.



1.3 Машинное обучение, его виды и области применения

Одно из распространённых заблуждений об искусственном интеллекте заключается в уверенности, что машины не могут учиться и, решая задачу, способны лишь следовать алгоритму — жёстко заданному программистами пошаговому сценарию.

В действительности то, что машины исполняют определённую программу, никак не мешает им учиться, для этого нужно только, чтобы программа воплощала тот или иной алгоритм обучения. В принципе, единственным необходимым для обучения условием является наличие у машины изменяемой памяти, но этим свойством машины обладают с давних пор.

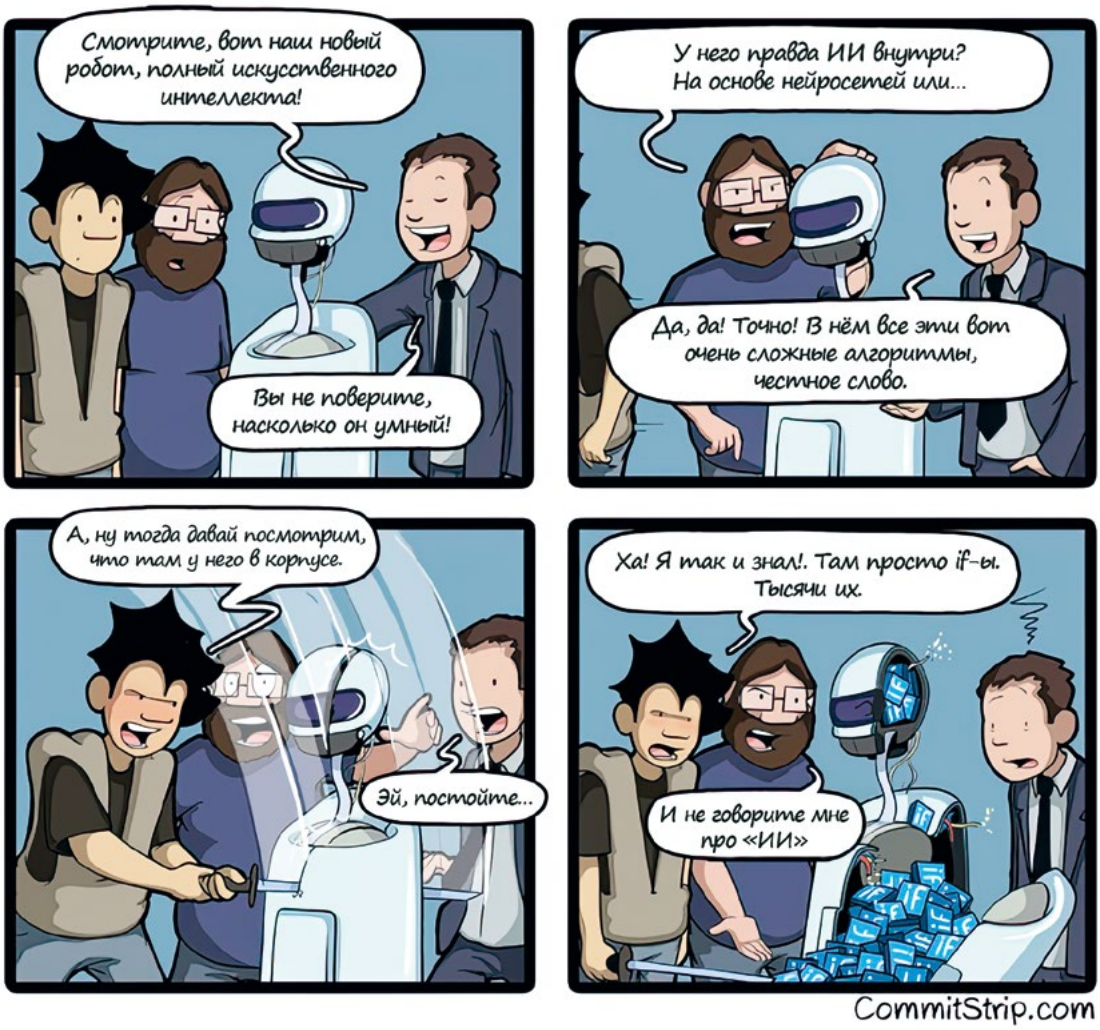
В качестве самого простого примера обучения можно привести программу, которая при первом запуске спрашивает имя пользователя, которое затем запоминает, чтобы при следующих запусках обращаться к этому человеку по имени. Легко заметить, что поведение программы от запуска к запуску поменяется, то есть программа «научится» правильно обращаться к вам, хотя программисты, создавая программу, не указывали в ней вашего имени. Конечно, обучение может быть разным: как и человек, одним вещам машина может обучиться с лёгкостью, другие же пока что находятся за пределами возможностей современных технологий ИИ, и эта граница постоянно сдвигается по мере того, как очередные задачи сдаются под напором достижений науки и технологии.

Машинное обучение (machine learning) — направление в искусственном интеллекте, обычно использующее статистические техники для придания компьютерам способности «обучаться» (т. е. постепенно улучшать результаты, достигаемые при решении той или иной задачи), основываясь на некоторых данных, без явного программирования. Термин был изобретён Артуром Сэмюэлом в далёком 1959 г.[35] Выражаясь более формально, можно сказать, что машинное обучение занимается созданием систем ИИ, в которых параметры моделей вычисляются в ходе автоматического или автоматизированного процесса обучения. Машинное обучение тесно связано с такими направлениями, как вычислительная статистика и теория оптимизации: эти дисциплины выступают в роли поставщиков конкретных методов и инструментов, применяемых в машинном обучении.

Большинство современных прикладных систем искусственного интеллекта созданы с привлечением методов машинного обучения. Поэтому может показаться, что искусственный интеллект и машинное обучение почти

тождественны, но на самом деле это не так. Со многими практическими задачами неплохо справляются старые добрые запрограммированные правила. Далее в книге мы увидим несколько примеров того, как построенные на основании правил системы могут демонстрировать весьма интеллектуальное поведение, производящее большое впечатление на внешнего наблюдателя.

И всё же сложнейшие из задач искусственного интеллекта требуют гораздо более гибких и мощных методов, поэтому машинное обучение сегодня — самое быстроразвивающееся направление в отрасли.



Виды машинного обучения 1.3.1

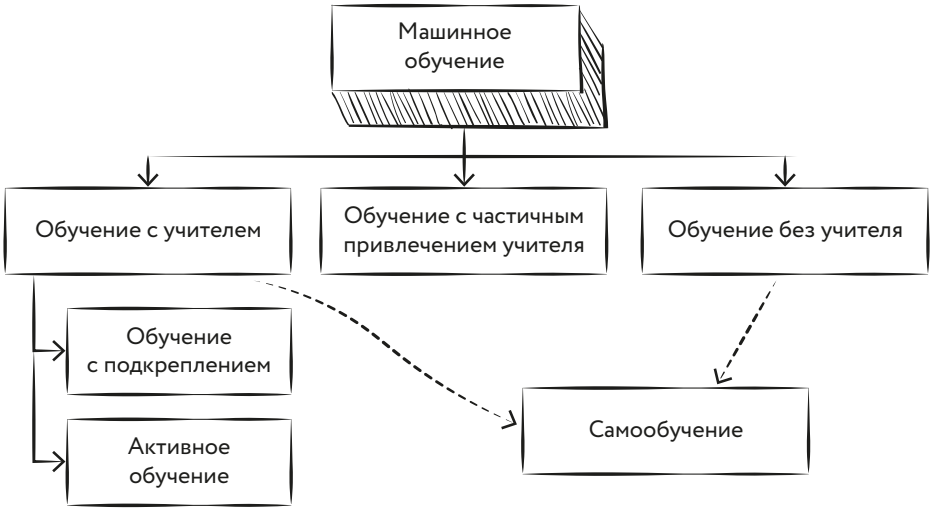


Рис. 3. Виды машинного обучения

Обычно машинное обучение разделяют на две большие категории в зависимости от наличия в обучающей системе обратной связи — некоторого сигнала, получаемого системой и содержащего информацию о том, является ли выбранное обучаемой моделью действие правильным (или неправильным). При наличии обратной связи задача машинного обучения называется задачей *обучения с учителем* [supervised learning].

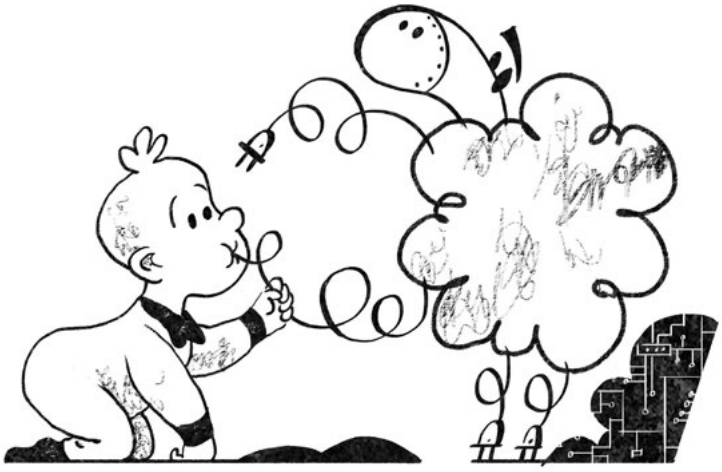
Часто в качестве обратной связи используется ручная разметка, выполненная людьми. Например, обучая модель отличать изображения кошек от изображений собак, мы можем отобрать несколько десятков тысяч фотографий и вручную сопоставить каждой из них правильную метку — «кошка» или «собака». Такой набор данных, содержащий исходные данные (в нашем случае — фотографии) и метки, называется *обучающей выборкой*, а каждая пара, состоящая из исходных данных и ответа на них (в нашем случае — метки класса), — *прецедентом*[36].

Иногда обучающая выборка по тем или иным причинам содержит пробелы. Например, маленький ребёнок не знает вкуса многих объектов, встречающихся в окружающем мире, поэтому с особым интересом запихивает в рот те предметы, которые ему ранее не приходилось пробовать. В таком случае можно говорить о том, что мы имеем дело с *активным обучением* — ещё одной разновидностью обучения с учителем. При таком подходе модель сама выбирает необходимые для обучения эксперименты и пополняет их результатами обучающую выборку. Конечно, при этом следует заботиться о том, чтобы последствия экспериментов не обошлись нам слишком дорого.

Активное обучение является частным случаем парадигмы, получившей название «обучение с подкреплением» [reinforcement learning]. Термин «подкрепление» (положительное или отрицательное) был позаимствован у психологов, под ним понимается ответный сигнал внешней среды, который позволяет обучающемуся агенту делать выводы о желательности или нежелательности выполненных действий. Обучение с подкреплением не обязано быть активным в том смысле, что агент не обязательно должен руководствоваться определённой «исследовательской» стратегией при выборе действий, агент не обязан быть «любопытным», его действия вполне могут быть обусловлены стремлением увеличить подкрепление в моменте («пихаем в рот то, что предполагаем вкусным, а не то, что ещё не пробовали») или быть и вовсе случайными («едим что попало»). Даже в таком случае обучение иногда может вполне успешно достигать поставленной цели.

На другом полюсе машинного обучения находятся методы *обучения без учителя* [unsupervised learning]. Казалось бы, будучи лишённым образца для подражания или какого-либо ориентира, ничему научиться нельзя. Однако это не так. Например, изучая недешифрованную письменность, можно выделить наборы повторяющихся знаков и их последовательностей, составить алфавит, оценить частоту возникновения последовательностей знаков, чтобы затем попытаться соотнести её с данными, полученными для других, известных нам языков. Конечно, набор задач, которые можно решить подобными способами, гораздо скромнее, чем в случае обучения с учителем, но в некоторых случаях, как в примере с недешифрованной письменностью, у нас просто нет выбора.

В последние годы с лёгкой руки известного исследователя в области нейронных сетей Яна Лекуна часто используется термин *self-supervised learning* (самообучение, самоконтролируемое обучение, обучение в режиме «сам себе учитель»). В его основе лежит автоматическая генерация обратной связи на основе структуры данных, используемых при обучении[37]. Например,



модель, которая предсказывает следующее слово в тексте по предшествующим, или модель, угадывающая скрытую часть картинки по её видимой части, вроде бы не требует размеченных людьми данных — достаточно лишь набора текстов или изображений, а разметку выполняет алгоритм. В случае задачи с текстом он создаёт из набора текстов множество прецедентов, в которых роль правильного ответа выполняет слово, продолжающее последовательность предшествующих ему слов, которые алгоритм включает в число факторов. В случае с картинкой факторами становятся видимые части изображения, а правильным ответом — скрытая его часть. Таким образом, самообучение можно рассматривать или как разновидность обучения без учителя, или как разновидность обучения с учителем, в которой роль суррогатного учителя выполняет алгоритм авторазметки.

В принципе, методы обучения с учителем и без учителя нередко могут комбинироваться в одной задаче. В таком случае принято говорить о методе *обучения с частичным привлечением учителя* [semi-supervised learning]. Например, создавая систему для распознавания речи, мы можем привлечь сравнительно небольшой набор размеченных вручную данных (аудиозаписей, снабжённых текстом выполненной людьми расшифровки) и огромный массив неразмеченных, «сырых» аудиозаписей. При помощи второго массива мы обучим модель различать регулярно повторяющиеся звуковые элементы речи — фонемы, — а затем при помощи первого массива научим её превращать последовательность фонем в текст.

Задачи, решаемые с помощью машинного обучения 1.3.2

Среди задач, решаемых при помощи методов машинного обучения, выделяют несколько крупных категорий.

1. Задачи классификации. Цель модели в них — отнесение объекта на основании его известных свойств к некоторым группам (*классам*). Иногда классы называют образами, в таком случае говорят о задачах распознавания образов[38]. Именно к этому типу относится задача различения кошек и собак на фото. В данном случае «кошка» и «собака» — это два разных класса, а известные свойства, или *факторы*, *модели* — это цвет каждой из точек на фотографии. Например, если мы имеем дело с чёрно-белыми фотографиями разрешением 1024 × 1024 точки, то всего у нас будет 1 048 576 входных факторов модели (цвет каждой точки будет представлен числом, характеризующим степень её яркости). При решении задачи классификации модель (в данном случае её называют *классификатором*), обучившись на некотором наборе объектов, должна будет уметь отнести к тому или иному классу в том числе и новые объекты, которых в обучающей выборке не было. Потому что

классификаторы, просто запоминающие всё, что им предъявили, и неспособные сделать вывод в отношении чего-то отсутствующего в обучающей выборке, нам обычно не очень интересны.

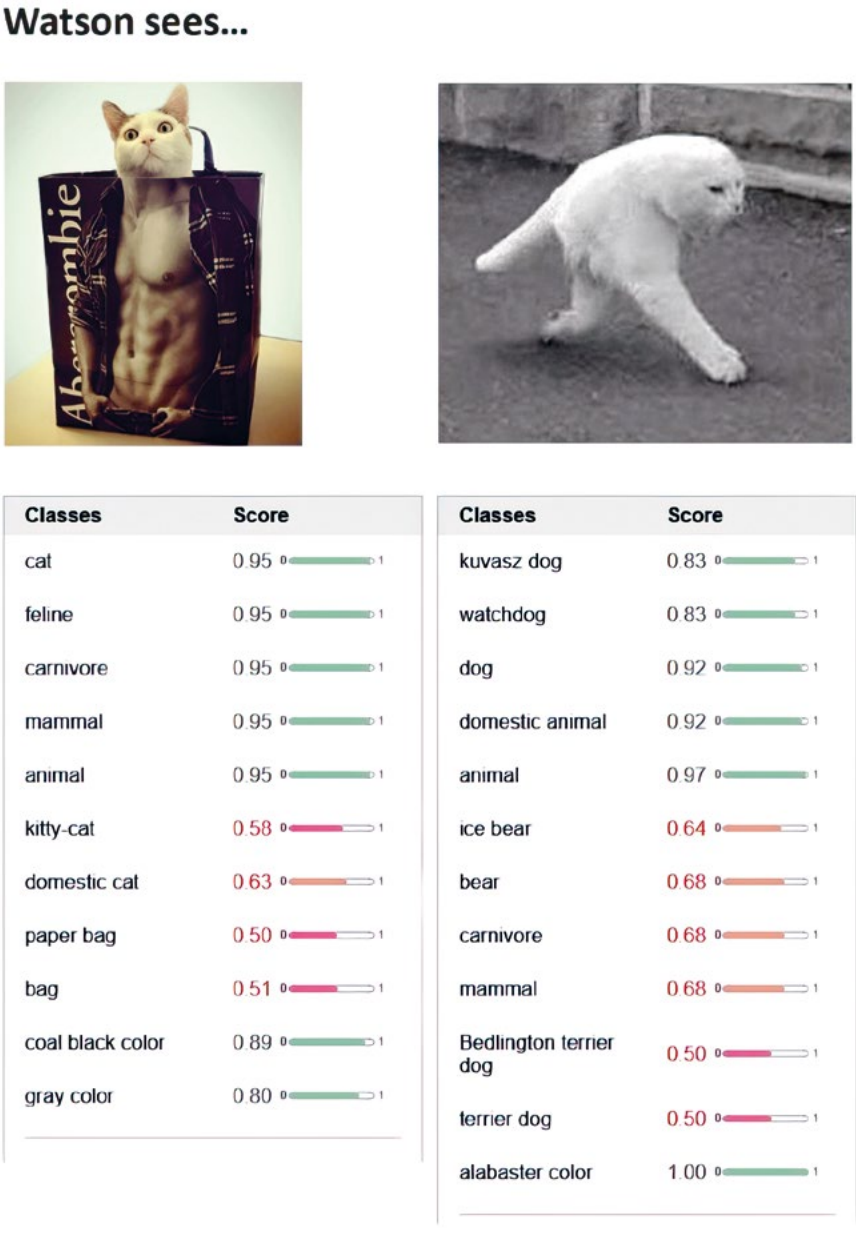


Рис. 4. Примеры решения задачи классификации для изображений. Модель посчитала, что первое изображение со степенью уверенности в 95% принадлежит к следующим классам: «кот» (cat), «животное семейства кошачьих» (feline), «хищник» (carnivore),

«млекопитающее» (mammal), «животное» (animal). Далее следуют классы с меньшей степенью уверенности модели: «кошечка» (kitty-cat) — 58%, «домашняя кошка» (domestic cat) — 63%, «бумажный пакет» (paper bag) — 50%, «сумка» (bag) — 50%. Потом идут ещё два класса: «угольно-чёрный цвет» (coal black color) — 89% и «серый цвет» (gray color) — 80%. Для второго изображения модель полагает, что это, скорее всего, «животное» (animal) — 97%, «домашнее животное» (domestic animal), «собака» (dog) — 92%, «сторожевая собака» (watchdog), «собака породы кувас» (kuvasz dog) — 83%. С меньшей степенью уверенности модель предполагает, что это «белый медведь» (ice bear) — 64% или «медведь» (bear) — 68% и т. д.

2. Задачи [восстановления] регрессии. Данные задачи в целом похожи на задачи классификации, но в них мы имеем дело не с множеством классов, к которым хотим отнести экзаменуемый объект, а с некоторой непрерывной величиной, которую желаем оценить на основании входных факторов. Простой пример — модель, пытающаяся определить возраст человека по фотографии. Любую задачу классификации можно свести к задаче регрессии, если взять в качестве прогнозируемой величины вероятность принадлежности объекта к каждому из классов.

Понятие регрессии ввёл в 1886 г. антрополог Фрэнсис Гальтон, изучавший статистические закономерности наследственности. В рамках разработанного им антропометрического подхода учёный измерял у своих соотечественников множество параметров: размеры головы, рост, возвышение над стулом при сидении, размах рук, объём вдыхаемого воздуха, массу тела, время реакции на зрительные и звуковые раздражители — и даже оценивал степень привлекательности девушек. На Международной выставке здоровья, открывшейся в 1884 г. в Лондоне, в антропометрической лаборатории Гальтона было проведено 150 000 отдельных измерений для 10 000 человек. Данные, собранные учёным, среди прочего содержали сведения о 928 потомках 205 матерей и отцов. Изобразив данные на графике, Гальтон обнаружил вполне ожидаемую положительную ассоциацию между ростом родителей и их детей, однако заметил, что дети наиболее высоких родителей имели тенденцию уступать своим родителям в росте, в то время как для наиболее низких родителей наблюдалась обратная зависимость: их дети обычно превосходили родителей ростом. Полученные данные повторяли результаты серии экспериментов 1876 г., в которых Гальтон изучал диаметр горошин; наиболее крупные горошины давали обычно более мелких, чем они сами, потомков, а наиболее мелкие — более крупных[39]. Гальтон назвал этот феномен «регрессией к среднему» и ввёл понятие «степень регрессии» (сегодня обычно её называют *коэффициентом регрессии*)[40]. Позже термин, возникший в частной прикладной задаче, закрепился за широким классом методов восстановления зависимостей[41].

Рис. 5. Примеры решения задачи регрессии для изображений (определение возраста)

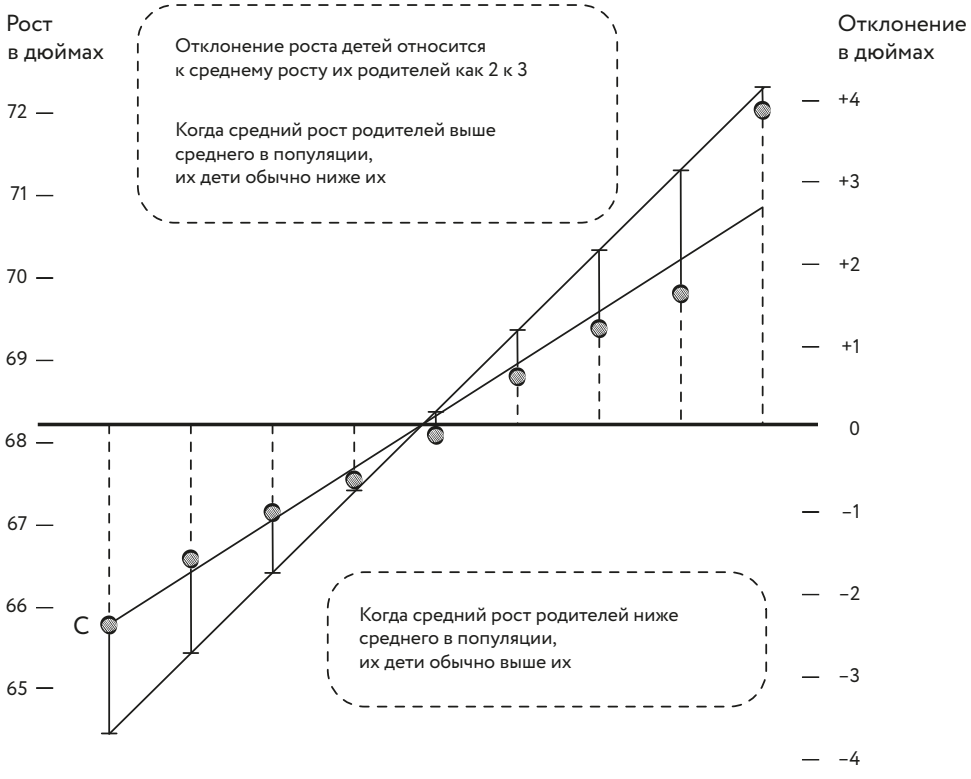
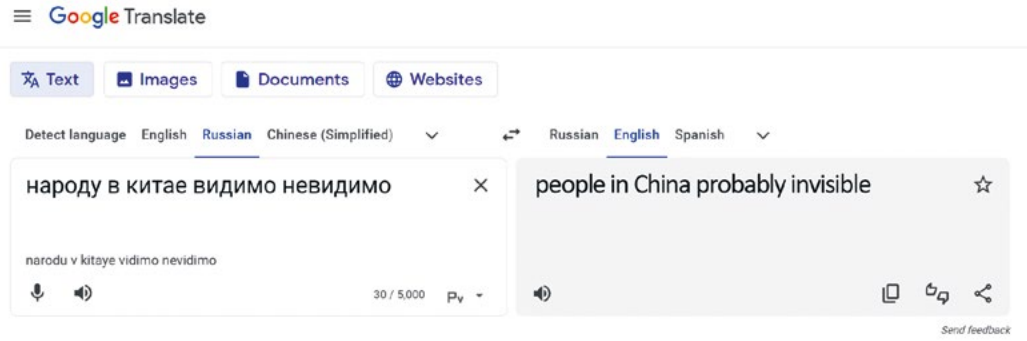


Рис. 6. Показатель регрессии в наследовании роста

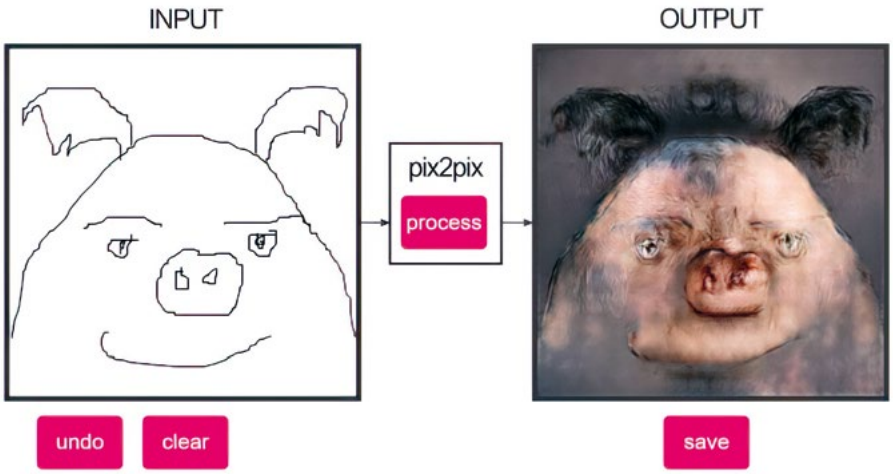
3. Задачи преобразования последовательностей, или, как их принято называть, seq2seq-задачи (от *sequence to sequence* — «последовательность в последовательность»)[42]. Модель получает на вход некоторую последовательность и должна выдать также некоторую последовательность, соответствующую входной. Простой пример — задача перевода текста с одного языка на другой. В данном случае входная последовательность — это текст, написанный на одном языке, выходная — перевод входного текста на другой язык. Другой пример — задача распознавания речи, при которой на вход модели подаётся последовательность звуковых амплитуд, а на выходе получается текстовая расшифровка речи. Задачи регрессии и классификации тоже можно представить в виде задачи преобразования последовательности в последовательность. В этом случае входная последовательность будет содержать значения входных факторов (или весь набор значений факторов в виде единственного элемента-вектора), а выходная будет состоять из одного элемента — метки класса или значения регрессии. Этот пример показывает некоторую условность выделения категорий задач машинного обучения. Когда мы относим ту или иную задачу к категории seq2seq, то обычно хотим тем самым подчеркнуть, что входные и выходные данные модели могут иметь переменную размерность. Если же, например, на входе нашей модели последовательность переменной длины, а на выходе — метка класса, то такая задача будет скорее отнесена к задачам *классификации последовательностей* (sequence classification)[43]. Примером такой задачи может быть выявление языка, на котором написан некоторый текст переменной длины. Аналогичным образом говорят о *регрессии последовательностей* (sequence regression)[44], в случаях когда на входе модели — последовательность, а на выходе — некоторая величина, например на входе — текст комментария в Facebook, а на выходе — предполагаемый возраст его автора.



4. Также важными разновидностями задач машинного обучения являются **задачи сокращения размерности** (dimensionality reduction)[45] и **задачи генерации (порождения) данных**[46]. Представим себе свидетеля преступления, который описывает внешность преступника словами: сообщает цвет глаз, рассказывает о причёске, форме носа и глаз, наличии или отсутствии усов,

бороды, воспроизводит другие особенности внешности, называет пол преступника, его ориентировочные рост и возраст. Такой набор свойств обычно называют признаками или фичами (от англ. *features*) объекта. Весь этот набор значений признаков куда более компактен, чем фото преступника, составленное из миллионов пикселей*. В данном случае мозг свидетеля выполняет роль модели, решающей задачу сокращения размерности входных данных. Художник же, который рисует портрет преступника по словесному описанию внешности, в данном случае выполняет роль генеративной модели, то есть такой модели, которая порождает в ходе своей работы новые данные (в нашем случае путём домысливания всех мельчайших деталей портрета). Модели машинного обучения, сочиняющие музыку, пишущие тексты или создающие изображения по заданию, также являются генеративными моделями.

Пары моделей, использующих одно и то же компактное представление данных, одна из которых преобразует данные в их компактное представление, а вторая — пытается по этому компактному представлению восстановить исходные данные, называют соответственно *кодировщиком* (encoder) и *декодером* (decoder).



1.3.3 Области применения машинного обучения

В наши дни методы машинного обучения применяются в самых разных областях человеческой деятельности. В таблице ниже представлены лишь некоторые из них**.

* Пиксель (от англ. сокращения от *pictures element*) — наименьший элемент двумерного цифрового изображения.

** Хемоинформатика (химическая информатика, молекулярная информатика) — применение методов информатики при решении химических проблем.

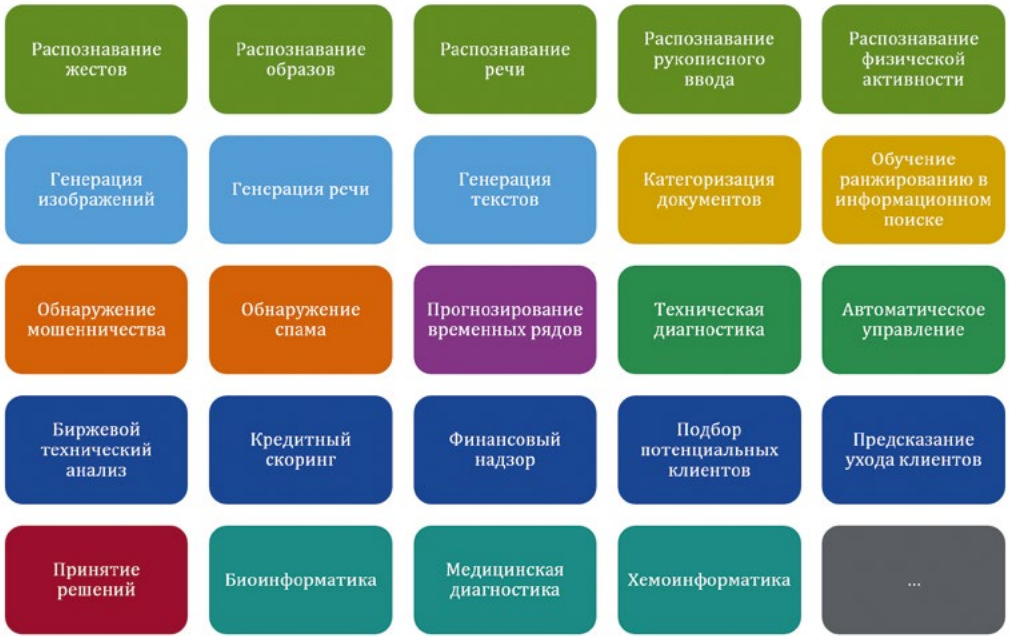


Рис. 7. Области применения методов машинного обучения

В этой книге мы поговорим о различных проектах, относящихся к большинству из перечисленных здесь областей. В силу того, что машинное обучение проникает в самые разные сферы, о нём нередко говорят как о технологии, лежащей в основе новой технологической революции. *«Принимая во внимание различные определения и научные доводы, используемые для описания первых трёх промышленных революций, я считаю, что сегодня мы стоим у истоков четвёртой промышленной революции. Она началась на рубеже нового тысячелетия и опирается на цифровую революцию. Её основные черты — это „вездесущий“ и мобильный Интернет, миниатюрные производственные устройства (которые постоянно дешевеют), искусственный интеллект и обучающиеся машины»*, — пишет президент Всемирного экономического форума профессор Клаус Шваб в своей книге «Четвёртая промышленная революция»[47, 48].

2

Сквозь тьму веков. История думающих машин

Что такое история как таковая — объяснять незачем, так как это каждому должно быть известно с молоком матери. Но что такое древняя история — об этом нужно сказать несколько слов.

Трудно найти на свете человека, который хотя раз в жизни, выражаясь языком научным, не вляпался бы в какую-нибудь историю. Но как бы давно это с ним ни случилось, тем не менее происшедший казус мы не вправе назвать древней историей. Ибо пред лицом науки всё имеет своё строгое подразделение и классификацию.

Скажем короче:

а) древняя история есть такая история, которая произошла чрезвычайно давно;

б) древняя история есть такая история, которая произошла с римлянами, греками, ассириянами, финикиянами и прочими народами, говорившими на мертворождённых языках.

Надежда Тэффи, Аркадий Аверченко, Иосиф Оршер, Осип Дымов. *Всеобщая история, обработанная Сатириконом*

Инструменты, помогающие выполнять интеллектуальные задачи, люди начали создавать так давно, что точная дата этого события нам неизвестна. Конечно, эти первые шаги человечества по пути развития думающих машин были бесконечно далеки от вершин современной технологии, и всё же, однажды вступив на путь вооружения умственного труда, человечество уже никогда не сходило с него. Каменное рубило стало продолжением рук человека, одежда из звериной шкуры — продолжением кожи, а охра и стены пещеры — продолжением человеческой памяти. За свою длинную историю люди перепробовали множество способов сохранения, накопления и передачи информации, начиная от царапин на раковинах моллюсков и заканчивая глиняными табличками, свитками папируса, причудливыми вампумами (образцами предметного письма коренных народов Америки) и магнитными дискетами. Некоторые из этих носителей информации позволили сохранить её на тысячелетия, а другие оказались менее долговечны, чем их создатели. Язык и знаковые системы сделали возможной передачу сведений от одного индивида другому, благодаря им важные сведения уже не утрачивались со смертью их носителя. Все эти инновации позволили во много раз усилить интеллектуальную мощь человека, стали основой дальнейшего технологического прогресса.

В этой книге мы остановимся только на нескольких любопытных примерах технологий прошлого и лишь с целью показать, что стремление к созданию «умных» инструментов вовсе не причудливая модернистская идея, возникшая из ниоткуда. Новые, более совершенные методы, применяемые нами для автоматизации умственной деятельности, обычно являются закономерным развитием идей предыдущих поколений.

2.1 Древние счётные устройства и механизмы

В город молодой человек вошёл в зелёном, узком, в талию, костюме. <…> В руке молодой человек держал астролябию. <…>

Он втиснулся в шеренгу продавцов, торговавших на развале, выставил вперёд астролябию и серьёзным голосом стал кричать:

— Кому астролябию?! Дёшево продаётся астролябия!! Для делегаций и женотделов скидка! <…>

К обеду астролябия была продана интеллигентному слесарю за три рубля.

— Сама меряет, — сказал молодой человек, передавая астролябию покупателю, — было бы что мерять.

Илья Ильф и Евгений Петров. *Двенадцать стульев*

2.1.1 Счёты, абак и астролябия

Одним из самых древних устройств, применяемых людьми не только для сохранения информации, но и для автоматизации операций, производимых с ней, является абак. Обычно этим словом обозначают различные разновидности счётных досок, применявшихся рядом древних культур для арифметических расчётов[49].

Во многих словарных статьях, посвящённых абаку, благодаря, по всей видимости, некритичному копированию текста из «Википедии», можно встретить следующее определение: «Аба́к (др.-греч. ἄβαξ, ἀβάκιον, лат. *abacus* — доска) — семейство счётных досок, применявшихся для арифметических вычислений приблизительно с V в. до н. э. в древних культурах…»[50]

У читателя, конечно, тут сложится впечатление, что слово «абак» происходит от древнегреческих ἄβαξ, ἀβάκιον, обозначающих доску. Крепкую дубовую или сосновую доску, которой так и хочется огреть незадачливого автора этого определения. Впрочем, ошибка эта весьма распространена[51]: целый ряд словарей утверждает, что ἄβαξ — это доска. В действительности в Древней

Греции для обозначения доски использовалось несколько разных слов. Например, если речь шла о дощечке, применяемой для выполнения рисунка, то по-древнегречески она называлась словом πίναξ, то есть «пинакс». От этого слова происходит слово «пинакотека» (помещение для хранения живописных изображений)[52]. В этом слове тот же корень, что и в русском слове «пень»[53]. Другое слово — δοκός — использовалось для обозначения толстых досок либо балок или бревна (которое не замечаешь в собственном глазу); δόρυ, σανίς[54] — всё это в той или иной степени доски, но вот ἄβαξ — это абак как устройство для счёта (правда, у этого слова есть ещё несколько значений, например в архитектуре ἄβαξ — это плита, венчающая колонну (по-русски «абака» — верхняя часть капители)[55], также это слово иногда могло обозначать поднос, туалетный столик, подставку для сосудов[56]). Латинское *abacus* — это тоже именно абак как устройство для счёта, потому что строительная доска — это *axis* или *lamina*, а доска для письма — *tabula* (помните *tabula rasa*?). Чтобы отличать абак от подносов и подставок, римляне заимствовали слово из древнегреческого в форме творительного падежа[57]. В общем, авторы словарной статьи про абак рассказали нам, что слово «абак» происходит от слова «абак».

Существует распространённое мнение, что ранние формы абака представляли собой дощечки, припорошённые песком, а само слово ἄβαξ — результат заимствования семитского корня: еврейского *ābāq* (אבק) (а-вак), обозначающего пыль, либо финикийского *abak*, обозначающего песок, — конкретные пути заимствования не ясны[58]. Но не все исследователи с этим согласны[59].

В древнегреческом языке песок обозначается словом ἄμαθος («аматос»), отсюда «абакомантия», также известная как «аматомантия» — вид гадания на основе интерпретации узоров в пыли, грязи, иле, песке или золе из недавно умерших[60].

Абак был распространён чрезвычайно широко. К 2700–2300 гг. до н. э. относится появление первого абака у шумеров — доски с колонками, предназначенными для представления величин последовательных порядков шумерской шестидесятеричной системы счисления[61]. Следует отметить изобретательность древних математиков — число 60 удобно тем, что делится без остатка на 2, 3, 4, 5 и 6, что упрощает многие практические операции. По мнению ряда исследователей, шестидесятеричная система счисления возникла в результате наложения более древних пятеричной и двенадцатеричной систем счисления[62, 63]. Пять — это число пальцев на руке, но откуда могла возникнуть двенадцатеричная система? Существует весьма остроумный способ счёта на пальцах одной руки, при котором большой палец указывает на одну из двенадцати фаланг остальных пальцев. Некоторые народы Нигерии, Индии и Тибета используют двенадцатеричную систему счисления в настоящее время[64, 65, 66].

Двенадцатые доли нередко использовались и в Европе. Древнеримская унция составляла 1/12 часть либры (меры веса), 12 унций составляют тройский фунт, 1 английский пенни (пенс) равен 1/12 части шиллинга, 1 дюйм — 1/12 фута и так далее.

Интересно, что преимущества двенадцатеричной системы счисления нашли сторонников в Новое время. В XVIII в. её адептом был французский математик и естествоиспытатель граф де Бюффон[67]. В 1944 г. было создано «Американское двенадцатеричное общество» (The Dozenal Society of America)[68], а в 1959-м — «Английское двенадцатеричное общество» (The Dozenal Society of Great Britain)[69], объединившие сторонников этой системы счисления. Рассудите сами, при помощи двенадцатеричной системы так удобно считать месяцы в году, христианских апостолов, колена Израиля, полутона в октаве, подвиги Геракла, знаки Зодиака, имамов, наследников Мухаммеда в шиизме, ступени колеса Сансары и бог знает что ещё.

Шестидесятеричной системе мы обязаны 60 секундами в минуте, 60 минутами в часе, 360 градусами в полном угле, минутами и секундами в географических координатах.

Но вернёмся к абаку. В Древнем мире абак был распространён чрезвычайно широко, и не всегда просто проследить конкретные пути заимствования этой технологии. Вполне вероятно, что счётные приспособления, подобные абаку, изобретались в истории человечества не единожды. На такую мысль наводит, например, информация о существовании сходных приспособлений для счёта в Новом Свете задолго до прибытия туда европейцев. В целом ряде источников о древней математике сообщается, что мезоамериканский абак назывался «непоуальцинцин» [nepoːwaɬˈt͡sint͡sin]. Это слово классического науатля (ацтекского языка) образовано от двух корней: «поуаль» или «поуалли» [ˈpoːwalːi] («счёт») и «цинцин» [t͡sint͡sin] («мелкие одинаковые элементы»). Приставка [ne] в данном случае является определителем существительного, образованного от возвратного глагола[70]. То есть всё в сумме означает примерно «подсчитыватель-при-помощи-фишек». Непоуальцинцин был основан на двадцатеричной системе счисления и иногда выполнялся в форме наручного браслета.

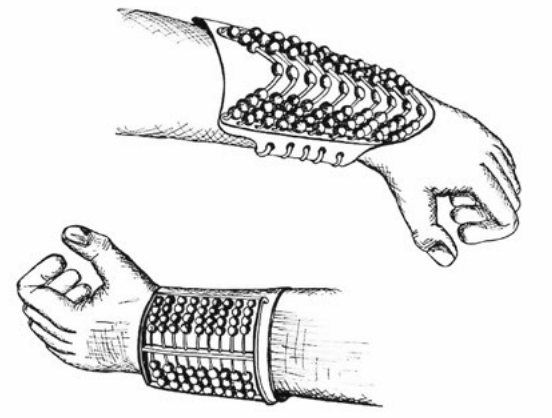


Рис. 8. Непоуальцинцин в форме наручного браслета

Наиболее древние изображения непоуальцинцина относятся к ольмекской культуре (не позднее III в. н. э.).

Типичный непоуальцинцин состоял из 13 рядов, каждый из которых насчитывал по семь бусин, разбитых вертикальным разделителем на две группы: в одной из них было четыре бусины,

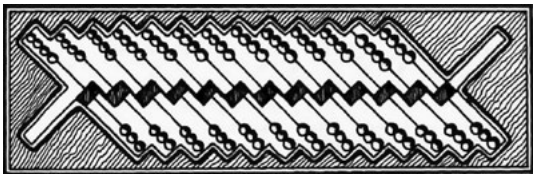


Рис. 9. Типичный непоуальцинцин (ольмекская культура)

а в другой — три. Первая группа использовалась для обозначения единиц, вторая — для обозначения пятёрок. Число набиралось путём передвижения бусин в направлении вертикального разделителя. Легко заметить, что каждый ряд мог быть использован для представления чисел от 0 до $3 \times 5 + 4 \times 1 = 19$. Использование 13 рядов позволяло набрать числа вплоть до $20^{13} - 1$, что составляет более 80 квадриллионов, то есть примерно в сто раз больше, чем число песчинок, которые потребуются, чтобы выложить расстояние от Земли до Солнца.

Количество бусин в одном непоуальцинцине ($13 \times 7 = 91$) приблизительно соответствует количеству дней каждого из времён года, в двух непоуальцинцинах ($91 \times 2 = 182$) — количеству дней от посева кукурузы до её сбора, в трёх ($91 \times 3 = 273$) — средней продолжительности беременности у людей в днях, в четырёх ($91 \times 4 = 364$) — продолжительности года в днях с ошибкой всего-то примерно в 1,25 дня[71].

Проблема с непоуальцинцином только одна — весьма вероятно, что он вовсе никогда не существовал. По сути, все современные источники отталкиваются от исследований мексиканского инженера-строителя Давида Эспарца Идальго. По словам исследователя, переоткрытие непоуальцинцина стоило ему развода и 18 лет скитаний по горам, пустыням и джунглям[72]. Идальго написал несколько книг про непоуальцинцин и активно пропагандировал использование этого устройства в педагогических целях, однако научное сообщество относится к его выводам довольно прохладно, так как материальная база исследований Идальго более чем скудна.

Немного лучше дела обстоят с абаком инков — «юпаной» (*yupay* на языке кечуа означает «счёт»). Слово «юпана» на самом деле используется для обозначения двух разных типов объектов. Дощечка-юпана, или археологическая юпана, — дощечка или плитка, на одной из сторон которой вырезана система лотков различного размера. Предполагается, что вычисления производились при помощи зёрен или камешков, размещаемых в лотках. Первая из таких дощечек была найдена в районе города Куэнка в Эквадоре в 1869 г. С тех пор подобные объекты попадались археологам не единожды — они выполнены из различных материалов и довольно сильно отличаются друг от друга.

Также известна так называемая юпана Пома де Айяла — изображение на 360-й странице иллюстрированного манускрипта «Первая новая хроника и доброе правление» (El primer nueva corónica y buen gobierno), созданного в конце XVI — начале XVII в. Отдельный интересный вопрос: какова степень участия в её создании формального автора этой хроники Фелипе Гуамана Пома де Айяла, представителя знатного рода Южного Перу, служившего переводчиком у испанцев? Юпана из хроники представляет собой клетчатое поле размером 5×4 клетки. В клетках изображены маленькие окружности, некоторые из них закрашены. Рядом с полем нарисован человек, держащий в руках кипу (от *khipu* — «узел» на языке кечуа) — сплетение верёвочек с узелками. Сопроводительный текст на следующей странице сообщает

примерно следующее: *«Они производили счёт на счётной доске, ведя его так: сто тысяч, десять тысяч, [одна тысяча], сто, десять, доходя до единицы. Всё то, что происходит в этом королевстве, они фиксируют: и праздники, и воскресенья, и месяцы, и годы. И каждый город, и селение, и посёлок имели из числа индейцев этих означенных счётчиков и казначеев этого королевства, и считали они следующим образом…»* Далее перечисляются названия цифр и чисел на кечуа[73].

Хотя юпана Пома де Айяла и напоминает археологические юпаны, нельзя обойти стороной и разницу. В первую очередь в глаза бросается то, что, в отличие от прямоугольных полей на изображении, лотки археологических юпан часто другой формы.

Рис. 10. Юпана Пома де Айяла

Существует несколько интерпретаций изображения хроники Пома де Айяла. Например, в 2008 г. Чинция Флорио предположила, что закрашенные кружки соответствуют единицам, пустые — десяткам, а на юпане изображена операция $32 \times 5 = 32 \times (2 + 3) = (32 \times 2) + (32 \times 3) = 64 + 96 = 160$, но результатом стало число 151, потому что автор хроники перепутал цвет одного из кружков[74].

«Первая новая хроника и доброе правление» — не единственный источник о способах счёта инков. Хосе де Акоста — испанский историк, географ и натуралист, миссионер и член ордена иезуитов — в трактате «Естественная и нравственная история Индии» (Historia natural y moral de las Indias) пишет следующее: *«они берут зёрна [кукурузы] и кладут одно сюда, три туда, восемь из другой части; они вынимают из коробки и заменяют три других зёрнышка одни на другие, чтобы в итоге получить безошибочный результат»*.

В общем, юпана выглядит в качестве потенциального аналога абака более солидно, чем непоуальцинцин, но и тут есть над чем поломать голову будущим классикам абакологии.

Китайский абак называется «суаньпань» (кит. трад. 算盤, упр. 算盘, пиньинь: suànpán), буквально: «счётная доска». В древнекитайском трактате под названием «Шу шу цзи и» (数术记遗), название которого можно перевести как «Заметки для потомков об искусстве чисел» или «Мемуары о правилах счёта», впервые упоминается «чжу суань» (珠算) («вычисление при помощи бусин»). Предполагается, что автором этого трактата является

древнекитайский астроном, математик и философ Сюй Юэ. Историки считают, что указание на подобный способ счёта означает наличие инструмента, подобного суаньпаню[75], но достоверные изображения древнекитайского абака появляются только в начале XII в.[76] Суаньпань — это прямоугольная рамка, в которой находится девять или более параллельных друг другу спиц или верёвок. Перпендикулярно им суаньпань разделяется на две неравные части дополнительной планкой. В большом отделении («земля») на каждой спице нанизано по пять бусин, в меньшем («небо») — по две. В основе суаньпаня лежит десятичная система счисления. Бусины, находящиеся «в небе», означают пятёрки, а «на земле» — единицы. Крайние бусины могут применяться для выполнения действий, связанных с переносом разряда, а также позволяют при необходимости производить расчёты в шестнадцатых долях, необходимые в классической китайской системе измерения весов[77].

Рис. 11. Китайский абак «суаньпань»

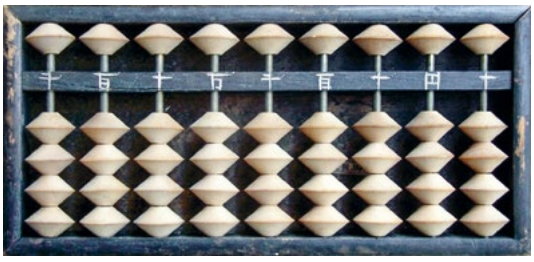


Рис. 12. Японский соробан

Помимо суаньпаня, китайская традиция счёта знает и более древний инструмент — счётные палочки, несколько найденных комплектов которых датируются III в. до н. э. Впрочем, существуют весьма убедительные свидетельства того, что счётные палочки применялись и раньше. Например, древнекитайский трактат «Дао дэ цзин» (кит. трад. 道德經, упр. 道德经, пиньинь: Dàodéjīng), традиционно датируемый VI в. до н. э. и созданный, по преданию, легендарным философом Лао-цзы, содержит высказывание: *«Тот, кто хорош в счёте, не использует счётных палочек»*[78].

В XIV в. китайский суаньпань был завезён в Японию, где лишился обеих «лишних» косточек «в небе» и «на земле» и стал традиционным японским соробаном (算盤 / そろばん)[79].

Примерно в то же время (около 1400 г.) китайский абак попадает в Корею. Корейцы называют его «чу пхан» (주판), «су пхан» (수판) или «чу сан» (주산).

«Абхидхармакоша» (санскр. अभिधर्मकोश abhidharmakośa — дословно «корзина абхидхармы») — сочинение в стихах, написанное буддийским философом

Васубандху в IV в. н. э., недвусмысленно свидетельствует о том, что автору было известно устройство, похожее на абак. Васубандху, цитируя рассуждения проповедника и философа Васумитры о дхарме, функционирующей в разных временных модусах, пишет буквально следующее: *«Это подобно тому, как шарик (костяшка), передвинутый в позицию единиц, называется единицей, в позицию сотен — сотней, в позицию тысяч — тысячей»* [80].

Русские счёты являются, по всей видимости, довольно поздним устройством, по поводу происхождения которого тем не менее нет окончательной ясности. В 1664–1665 гг. в составе голландского посольства Якоба Борейля Россию посетил Николаас Витсен, голландский политик, предприниматель, картограф и будущий бургомистр Амстердама. В своём путешествии Витсен вёл дневник, делал многочисленные заметки и зарисовки. В 1692 г. он выпустил в Амстердаме сочинение «Северная и Восточная Тартария» (Noord en Oost Tartarye), в котором мы находим следующее суждение: *«Этот старый Строганов привёз в Россию, как говорят, счёты, или арифметику, которые они ещё употребляют до сего дня. Это костяные бусинки, нанизанные на железные прутики»* [81]. Этот короткий фрагмент текста цитируют позже Миллер в своём «Описании Сибирского царства» [82], а вслед за ним и Карамзин [83] в «Истории государства Российского». Хотя ни Карамзин, ни Миллер, ни тем более Витсен напрямую не называют счёты непосредственным наследником китайского суаньпаня, идея заимствования именно китайского абака через татар является заманчивой. Но всё-таки вряд ли стоит выстраивать теорию на основе одного-единственного исторического анекдота * и частичного конструктивного сходства двух устройств. Тем более что счёты всё-таки заметно отличаются от суаньпаня — вертикальной ориентацией, отсутствием разделителя, иным способом набора чисел. Сам термин «счёты» в варианте «счоты» впервые встречается в «Переписной книге домовой казны патриарха Никона», составленной в 1658 г.: *«Да в коробе ево ж Сергиева рухлядь:*

Схима.
Два свешника, один медной, а другой железной полужен.
Вески да два фунта.
Зеркало в досках.
Счоты.
Два ножика, у одного черен репчатой жуки серебряные, а у другова черен костяной рыбей» и так далее [84].

К XVI–XVII вв. относятся русские рукописные арифметики, объединённые общим названием «Цифирная счётная мудрость». В более ранних списках описываются «дощаный счёт» и «счётная дщица». По всей видимости, именно эти приспособления являются предшественниками счётов.

* Соседствующего, между прочим, с историей о происхождении фамилии Строганов от умерщвления основателя рода татарами, выполненного путём строгания, то есть изрубливания на мелкие кусочки.

Хотя в наши дни счёты уже практически вышли из обихода, они оставили множество следов в русском языке. Именно им мы обязаны такими словами и выражениями, как «скостить», «скинуть», «накинуть», «сбрасывать со счетов», «сводить счёты» и тому подобное.

Использованию счётов и дощаного счёта предшествовал «счёт костьми», при котором счётные косточки раскладывались на столе[85]. Подобный способ был, по всей видимости, универсален для Древнего мира. Например, о подсчёте при помощи гальки (λογίδονται ψήφοισι)[86] в Древнем Египте мы знаем от Геродота, отмечавшего, что египтяне выкладывали камешки справа налево, в направлении противоположном принятому у греков[87], при этом само слово «абак» Геродот в данном контексте не упоминает, и достоверные древнеегипетские изображения абака нам неизвестны[88]. Точно так же герой «Агамемнона» Эсхила упоминает о подсчёте убитых при помощи камешков (τί τοὺς ἀναλωθέντας ἐν ψήφῳ λέγειν — «Почему мы должны камешками подсчитывать убитых?»)[89]. Дважды подобный способ счёта встречается у Аристофана в комедии «Осы». Первый раз Филоклеон просит Зевса превратить его в один из камней, на которых ведут подсчёт голосов (ἢ δῆτα λίθον με ποίησον ἐφ᾽ οὗ / τὰς χοιρίνας ἀριθμοῦσι)[90]. Эта цитата интересна тем, что здесь упоминаются не камешки, при помощи которых осуществляется счёт, а камень, на поверхности которого данные расчёты производятся. Во второй раз Бделиклеон говорит отцу, что доходы и расходы (в их конкретном случае) можно

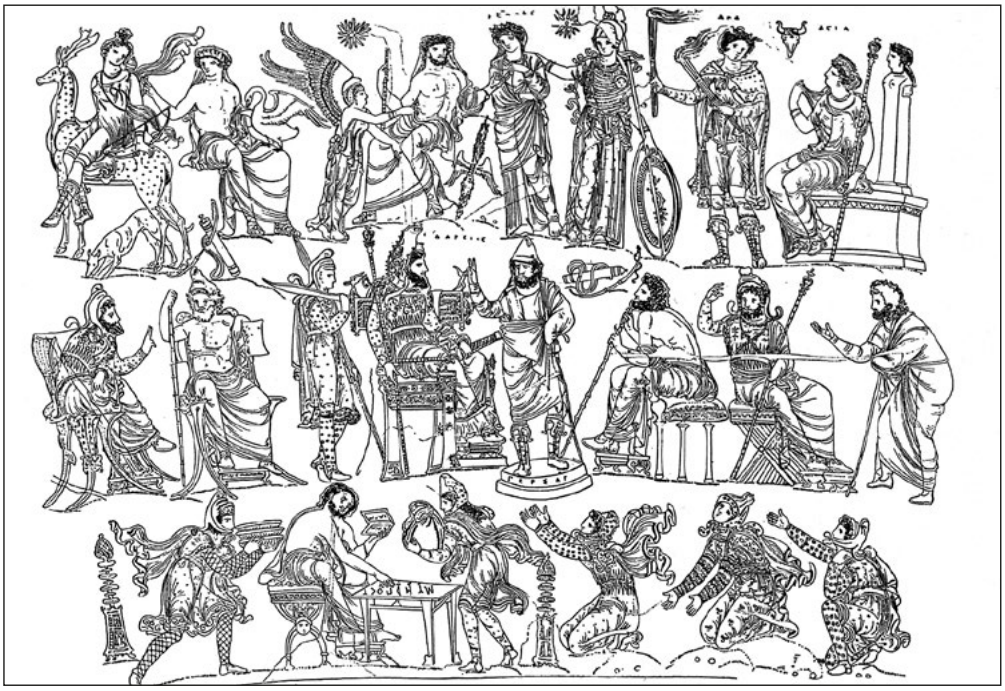


Рис. 13. Военный совет Дария. Изображение на «Вазе Дария» (340–320 гг. до н. э.)

счесть на пальцах, не прибегая к камешкам (καὶ πρῶτον μὲν λόγισαι φαύλως, μὴ ψήφοις ἀλλ᾽ ἀπὸ χειρός, / τὸν φόρον…)[91].

В «Афинской политии», написанной Аристотелем или одним из его учеников, описывается процедура судебного голосования при помощи абака (ἐξερῶσι ἐπὶ ἄβακα τρυπήματα ἔχοντα ὅσαιπερ εἰσὶν αἱ ψῆφοι) с отверстиями для камешков, каждый из которых соответствовал одному поданному голосу[92].

Первые археологические свидетельства использования абака в Древней Греции относятся к V в. до н. э.[93] Наверное, наиболее известное из них — изображение на «Вазе Дария» (340–320 гг. до н. э.), хранящейся в настоящее время в Национальном археологическом музее Неаполя[94]. На сцене, изображающей военный совет, мы видим человека, сидящего за небольшим столиком, на поверхности которого начертаны буквы и разложены камешки.

Абак в своих сочинениях упоминают Демосфен и Полибий[95]. Последний пишет: «Придворные — как камни на счётной доске: захочет счётчик, и они будут стоить один халк, а захочет — так и целый талант»[96]. Похожую мысль Диоген Лаэртский приписывает Солону[97].

Абак, найденный на греческом острове Саламин в 1846 г. (саламинская доска), относится к 300 г. до н. э., что делает его древнейшей счётной доской, обнаруженной до сих пор. Это плита белого мрамора размером 149 × 75 × 4,5 см с нанесёнными на неё метками для счёта[98].

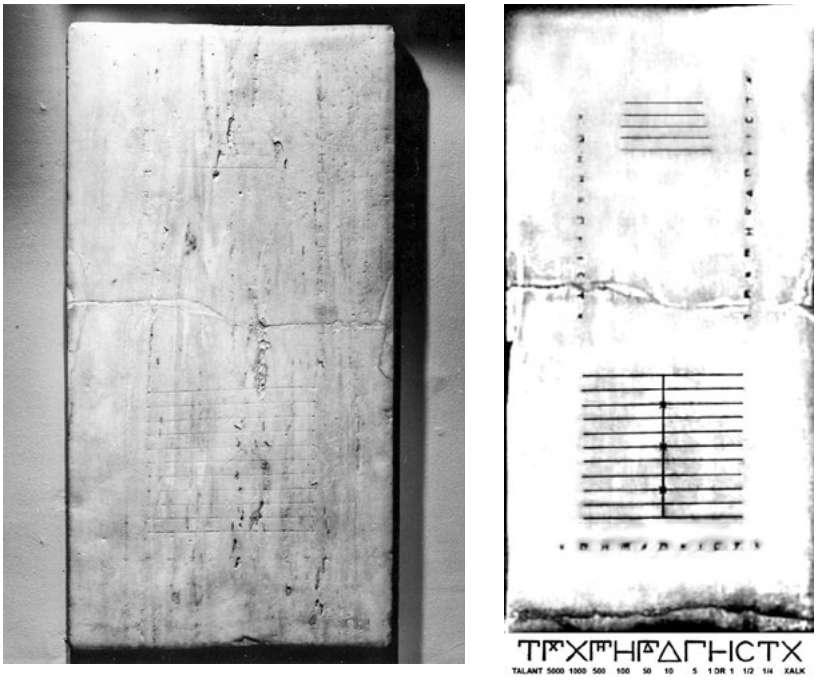
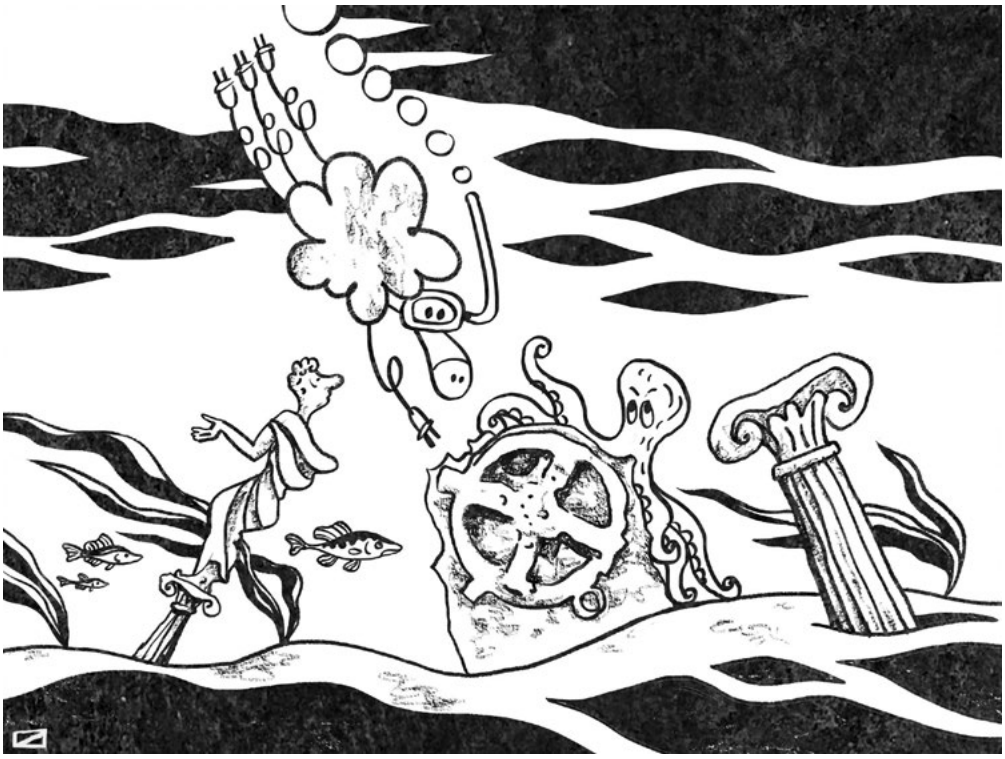


Рис. 14. Саламинская доска (300 г. до н. э.)

Антикитерский механизм 2.1.2

Впрочем, древнегреческая цивилизация в период расцвета смогла создать и куда более сложные вычислительные устройства, чем размеченная мраморная доска. Речь о знаменитом Антикитерском механизме — устройстве, обнаружение которого заставило во многом пересмотреть существовавшие на тот момент представления о возможностях античных технологий.



4 апреля 1900 г. между островом Крит и полуостровом Пелопоннес, поблизости от берегов острова Антикитера (Αντικύθηρα), были обнаружены останки античного корабля. Редкой находке помог случай: судно греческих ловцов губок с острова Сими (находившегося в это время под турецкой оккупацией) под командованием капитана Димитриоса Контоса остановилось в этом месте, чтобы дождаться благоприятных ветров. Воспользовавшись моментом, капитан отправил команду водолазов на поиски губки. Один из них, Илиас Стадиадис[99], вскоре вернулся на поверхность с глубины около 60 м[100] и сообщил, что на дне видит кучу разлагающихся трупов людей и лошадей[101]. Сделав закономерный вывод о том, что водолаз немного не в себе, по всей видимости по причине азотного опьянения, капитан решил тем не менее самостоятельно спуститься на дно для проверки. Погрузившись на

глубину, Контос увидел множество фигур — они лежали на дне вдоль берега на протяжении примерно 50 м. Это были не тела, а статуи, одни — мраморные, другие — из покрытой окислами бронзы. Капитан взял бронзовую руку одной из статуй, привязал её к страховочному тросу и вернулся обратно на корабль.

После возвращения с промысла Контос рассказал о находках своему земляку с Сими, профессору археологии Афинского университета Антониосу Иконому. Бронзовую руку отвезли в Национальный археологический музей в Афины и показали его директору — археологу Валериосу Стаису. Оценив важность находки, тот организовал встречу моряков со своим двоюродным братом, Спиридоном Стаисом, занимавшим в те годы пост министра образования[102]. *«Если правительство предоставит необходимое оборудование — лебёдки для подъёма предметов с морского дна, — сказал Контос министру, — мои люди готовы спуститься за ними при условии, что им заплатят полную цену за всё, что им удастся спасти»*. Стаис согласился на условия Контоса, но настоял на том, чтобы на борту в качестве руководителя работ присутствовал профессиональный археолог. Им стал профессор Иконому. Он отправился в первую экспедицию к месту крушения антикитерского корабля на борту греческого военного транспорта «Микале». На двух рыбацких судах его сопровождала команда Контоса. Работы начались 24 ноября 1900 г. Несмотря на тяжёлые погодные условия, водолазы за три часа подняли на поверхность бронзовую голову бородатого мужчины (возможно, Биона Борисфенита[103]), бронзовую руку кулачного бойца, бронзовый меч, две маленькие мраморные статуи (с отбитыми головами), мраморную ступню, несколько фрагментов бронзовых и мраморных статуй, бронзовые котлы, глиняную посуду и другую керамику. Приостановив работы по причине ухудшившейся погоды, экспедиция вернулась в Афины, где была встречена всеобщим ликованием.

На втором этапе работ, начавшемся 4 декабря 1900 г., «Микале» сменил более манёвренный корабль — паровая шхуна «Сирос». Работы продолжались десять месяцев, до сентября 1901 г., и велись на пределе человеческих возможностей. Первые декомпрессионные таблицы (таблицы Холдейна) появятся только в 1907 г., а получат распространение ещё позже, поэтому водолазам Контоса приходилось работать «на глазок», под угрозой гибели или инвалидности от кессонной болезни. Согласно подсчётам Фэйт Уорн, автора книги «Горькое море» (Bitter Sea. The Real Story of Greek Sponge Diving, 2000), в период между 1866 и 1910 гг. от кессонной болезни умерло около 10 000 ныряльщиков и ещё почти 20 000 остались парализованными — это около половины тех, кто ежегодно уходил на глубину. Не обошлась без жертв и экспедиция 1900–1901 гг.: один водолаз погиб, а двое других — были парализованы[104].

20 мая 1902 г. Спиридон Стаис, на тот момент уже бывший министр образования, приехал в Национальный археологический музей с целью оценить прогресс в изучении находок экспедиции. Осматривая вместе со своим двоюродным братом найденные предметы, он обратил внимание на фрагмент неизвестного механизма с бронзовыми шестернями, хранившийся в одной

из коробок. К этому моменту внешние слои бронзы уже разрушились под влиянием кислорода и влаги воздуха (древняя бронза может тысячи лет сохраняться на морском дне, но после извлечения на поверхность без специальной обработки начинает быстро разрушаться). Высохшие деревянные части, прилипшие к бронзовым, свидетельствовали о том, что механизм хранился в шкатулке. Его останки представляли собой четыре рассыпающихся фрагмента, бóльшую часть внешних поверхностей которых покрывал слой известняка. Однако, без сомнения, это был древний механизм, напоминающий часовой.

Первичный анализ фрагментов устройства выявил наличие в нём как минимум 15 шестерён. Точность их исполнения наводила на мысли о вычислительной природе устройства. К изучению механизма были привлечены Иоаннис Своронос, директор Национального нумизматического музея Афин и специалист по античным монетам и надписям, Адольф Вильгельм — австрийский эксперт по античным надписям, оказавшийся волей случая в Афинах, и Периклес Редиадис, в ту пору лейтенант греческого флота и профессор геодезии и гидрографии Королевской военно-морской академии.

Спустя несколько дней Вильгельм выдвинул предположение, что надпись на механизме сделана между II в. до н. э. и II в. н. э. В прессе тем временем развернулась активная полемика по поводу назначения устройства. В 1903 г. Редиадис опубликовал первый доклад по результатам произведённого анализа под редакцией Свороноса. Последний сумел расшифровать 220 полустёршихся греческих букв, в том числе несколько полных слов, сравнил их начертания с надписями на античных монетах и высказал мнение, что надписи датируются первой половиной III в. Редиадис составил описание фрагментов устройства и отметил, что поскольку оно помещалось в деревянном ящике, как и навигационные приборы на современных кораблях, то предмет, во всей видимости, был не грузом, а корабельным инструментом. Анализируя надписи, расшифрованные Свороносом и Вильгельмом, Редиадис предположил, что они выполняли роль инструкций, и отдельно отметил одно интересное греческое слово — μοιρογνωμόνιον (в современном греческом μοιρογνωμόνιο означает «транспортир»). Этим словом обозначался инструмент для определения градуса возвышения[105], указатель на шкалу в диоптре[106]; оно встречается в одном из самых ранних дошедших до нас детальных описаний устройства астролябии (VI в.). Основываясь на этих соображениях, Своронос и Редиадис сделали вывод, что Антикитерский механизм является разновидностью астролябии — угломерного инструмента для измерения высот светил и определения широты и долготы в астрономии, а также горизонтальных углов при землемерных работах[107].

Несколько слов об астролябии. Оксфордский словарь английского языка сообщает, что название этого инструмента происходит от греческого ἀστρολάβον (форма среднего рода от слова ἀστρολάβος — дословно «берущий звёзды» или «ловец звёзд»)[108]. Кроме своих основных функций, усовершенствованные

астролябии могли использоваться для определения направления на какой-либо географический пункт, времени восхода и захода светил и даже для выполнения тригонометрических расчётов.

Астролябией, по всей видимости, пользовался Клавдий Птолемей, хотя словом ἀστρολάβον он называл другое, более простое устройство — армиллярную сферу. В науке существует открытая дискуссия о том, кого следует считать создателем первой астролябии — самого Птолемея, детально описавшего необходимые для создания устройства принципы в работе «Планисферий», Гиппарха, который более чем за 200 лет до Птолемея разработал принципы стереографической проекции, Аполлония Пергского, а то и вовсе Евдокса Книдского. Идеи греков были подхвачены на арабском Востоке, где с VIII в. искусство изготовления астролябий достигло небывалых высот.

Корпус классической астролябии, «тарелка», — круглая деталь с бортом и подвесным кольцом, позволяющим точно выровнять прибор относительно горизонта. На внешний контур тарелки современной астролябии нанесены шкалы в градусах и в часах (в старинных астролябиях — 12 знаков зодиака по 30°).

Внутри «тарелки» находится «тимпан» — плоский, обычно сменный диск, на поверхность которого в стереографической проекции нанесены точки и линии небесной сферы, остающиеся неизменными при её суточном вращении: полюс мира в центре тимпана и концентрические окружности небесного экватора, Северного и Южного тропиков (последний обычно служил границей тимпана), прямая вертикальная линия небесного меридиана, горизонт и его параллели — «альмукантараты», точка зенита и проходящие через неё азимутальные круги. Поскольку положение горизонта и зенита зависит от широты места наблюдения, для разных широт используются разные тимпаны.

Сверху на тимпан накладывается «паук» — круглая решётка, на которой опять же в стереографической проекции при помощи изогнутых стрелок-указателей показано положение наиболее ярких звёзд (обычно от 10 до 60), расположенных севернее южного тропика. На поверхности «паука» обозначен также зодиакальный круг со шкалой, показывающей годовое движение Солнца по эклиптике. В некоторых астролябиях такая шкала отражает даже неравномерность этого годового движения.

Паук, тарелка и подвижная линейка — алидада — крепятся на центральной оси, проходящей через центральные отверстия перечисленных деталей, при этом алидада может находиться на любой из сторон инструмента (иногда устанавливались две линейки — с обеих сторон астролябии).

На тыльной стороне астролябии, в зависимости от вкусов и потребностей пользователей, могут также находиться различные номографические шкалы, например шкалы тангенсов («прямая тень», *umbra recta*) и котангенсов («обратная тень», *umbra versa*), шкала для пересчёта равных часов, шкала для определения «киблы» (направление в сторону священной Каабы в Мекке) и так далее.

При использовании астролябии сначала измеряют высоту Солнца или звезды с помощью алидады, а затем поворачивают «паук» таким образом, чтобы изображение точки эклиптики, в которой находится Солнце в данный момент года, либо изображение звезды попало на линию альмукантарата, соответствующего высоте. При этом на лицевой стороне астролябии получается актуальное стереографическое изображение неба, после чего определяются азимут светила и точное время, а также гороскоп (от др.-греч. ὥρα — промежуток времени, период и др.-греч. σκοπός — наблюдатель) — градус эклиптики, восходящий (пересекающий горизонт) в момент наблюдения.

К сожалению, до нас не дошло ни одной древнегреческой астролябии. Самая ранняя сохранившаяся до наших дней древняя астролябия датируется 927–928 гг., она основана на исламском календаре, содержит надписи, выполненные куфическим письмом*, и изготовлена мастером по имени Настулус или Бастулус. Сегодня эта находка хранится в музее Школы восточных и африканских исследований Лондонского университета (SOAS University of London, School of Oriental and African Studies)[109].

Рис. 15. Древняя астролябия (927–928 гг.)
Источник изображения — historyofinformation.com

Вернёмся к Антикитерскому механизму. С точки зрения современной науки выводы Редиадиса о том, что Антикитерский механизм является астролябией, нельзя не признать поспешными. Во-первых, там, где Редиадис прочитал слово μοιρογνωμόνιον, мы можем разобрать лишь γνωμο, то есть *gnomo* вместо [*moiro*] *gnomo*[*nion*]; γνωμόνιον означает просто «указатель». Наличие зодиакальной шкалы, безусловно, подталкивает нас к мысли о том, что Антикитерский механизм был астрономическим прибором, но всё же он был слабо похож на известные конструкции астролябий. Во-вторых, астролябии не были квадратными, их не хранили в деревянных ящиках, подавляющее большинство астролябий не содержит шестерён. Правда, одна из известных нам астролябий включает дополнение в виде механического календаря. Судя по выгравированной надписи, она была сконструирована мастером Мухаммадом ибн Аби Бакром из Исфахана, датируется 1221–1222 гг. н. э. и являет собой, между прочим, единственный пример дошедшего до нас средневекового шестерённого механизма, созданного в исламском мире. Зубцы шестерён календаря Мухаммада ибн Аби Бакра выполнены с исключительной точностью, превосходящей византийские аналоги того же времени[110]. Сегодня эта астролябия хранится в коллекции Музея истории науки Оксфордского университета[111].

* Куфическое письмо — один из наиболее древних видов арабского письма, созданный в конце VIII в.; сыграл значительную роль в дальнейшем развитии всей арабской каллиграфии.

Редиадис фактически предполагал, что Антикитерский механизм — это неизвестный ранее вид астролябии, в котором положение Солнца и время дня определялись не по выгравированным картам и шкалам, а при помощи стрелок, управляемых набором шестерён. Увы, ни Редиадис, ни его редактор Своронос не объясняли, зачем потребовалось создавать столь сложный механизм для решения задачи, с которой прекрасно справлялась обыкновенная астролябия. Впрочем, не все учёные того времени были согласны с Редиадисом и Свороносом. Принципиально иной точки зрения придерживался историк мореплавания Константинос Радос. Выступая на Первом международном конгрессе по классической археологии в Афинах (1905), Радос заявил: мысль о том, что найденное устройство — астролябия, следует признать абсурдной. В противовес он выдвинул идею, что Антикитерский механизм — это древний корабельный одометр, то есть прибор для измерения пройденного пути, описанный в трактате Герона Александрийского «О диоптре» (Περί διόπτρας)[112, 113].

Объяснение Радоса было по сути зеркальным отражением объяснения Редиадиса: если Редиадис, основываясь на надписях и символах на механизме, игнорировал его конструкцию, то Радос, напротив, игнорировал символы и надписи, руководствуясь только элементами конструкции.

В 1905 и 1906 гг. молодой филолог Альберт Рем (позже — один из крупнейших в мире специалистов по античным надписям) изучил фрагменты в ходе двух или трёх коротких поездок в Афины. Рем имел некоторое преимущество по сравнению с предыдущими исследователями, поскольку его исследованиям предшествовали работы по консервации механизма, произведённые химиком Отоном Розопулосом. Розопулос удалил налёт при помощи цианида калия и обработал очищенные и вновь открывшиеся поверхности цапонлаком (прозрачным раствором нитроцеллюлозы в органическом растворителе)[114]. Рем смог прочитать на передней шкале третьего фрагмента скрытое прежде слово: Παχών (пахон) — это греческое название девятого месяца древнеегипетского календаря. Указывать названия месяцев на навигационном приборе, так же как и на одометре, не имеет особого смысла, поэтому у Рема зародилась собственная гипотеза — он предположил, что Антикитерский механизм представляет собой планетарий, показывающий обращение Солнца, Луны и планет вокруг Земли. По мнению Рема, это могло быть устройство, подобное планетарию Архимеда, упоминаемому Цицероном[115]. Но как оно оказалось на борту корабля? Оно могло быть частью груза, входить в число богатств, которые корабль, по всей видимости, перевозил из Греции в Рим.

На версию Рема откликнулся Редиадис, который не согласился с молодым филологом, указав на то, что даже если механизм и не является астролябией, то ещё менее вероятно, что это планетарий, так как детали механизма плоские и слишком слабые для устройства сферической формы. Кроме того, он вновь повторил свой аргумент, что поскольку устройство находилось на корабле и помещалось в деревянной шкатулке, то, скорее всего, оно относится к корабельному оборудованию.

Дискуссия по поводу предназначения Антикитерского механизма понемногу утихла — каждый из специалистов остался при своём мнении. Единственное крупное исследование, произведённое в довоенный период, принадлежало перу Иоанниса Теофанидиса — греческого контр-адмирала в отставке, занимавшегося вопросами военной истории. Он заинтересовался находкой в 1920-е гг. в процессе подготовки статьи для морской энциклопедии о путешествиях апостола Павла. Хотя во времена Теофанидиса «Википедии» ещё не было, некоторым людям уже тогда удавалось, занявшись одной темой, постепенно переходя по ссылкам, обнаружить себя в 4 утра за чтением статьи ~~о теореме о причёсывании ежа~~ об Антикитерском механизме.

Первые результаты работы Теофанидиса были опубликованы в 1934 г. После удаления известкового налёта на лицевой пластине основного фрагмента механизма нашлось большое кольцо с градуированной шкалой по окружности. Исследователь подтвердил, что большое крестообразное зубчатое колесо было связано с несколькими шестернями, меньшими по размеру, и описал рукоятку сбоку, которая, по всей видимости, приводила в движение главное колесо. Теофанидис придерживался мнения, что механизм представляет собой навигационный прибор. Как и Рем, он считал, что устройство применялось для вычисления точного положения небесных тел, при этом верные соотношения скоростей их движения обеспечивали передаточные отношения зубцов шестерён. Теофанидис выдвинул гипотезу, что при установке стрелки прибора в соответствии с тенью, которую отбрасывает стержень, находящийся в центре концентрических окружностей, можно было, приведя механизм в движение, вычислить точное местоположение корабля.

Вторая мировая война заставила учёных надолго забыть об Антикитерском механизме. Экспонаты Национального археологического музея во время оккупации и последовавшей гражданской войны были спрятаны сотрудниками, и большая их часть, включая механизм, пережила военное лихолетье.

В 1950-е гг. масштабное исследование устройства предпринял Дерек Прайс — британско-американский историк науки, основатель современной наукометрии. Именно ему мы обязаны открытием закона Прайса, определяющего соотношение между количеством авторов в каждой предметной области и количеством публикаций. Прайс установил, что 50% публикаций в каждой из областей науки создаётся примерно квадратным корнем из числа всех авторов, то есть если в некоторой сфере существующие 100 публикаций были сделаны 25 учёными, то 5 учёных будут числиться среди авторов примерно 50 работ.

Строго говоря, появлением этого исследования механизма мы во многом обязаны Американскому философскому обществу (American Philosophical Society), которое в 1958 г. выдало Прайсу исследовательский грант № 2379 на сумму 460 долларов США. Исчерпывающий отчёт о приключениях этих 460 долларов можно найти в недавнем исследовании Александра Джонса с концептуальным наименованием «Как если бы вы нашли атомную бомбу

в пирамиде: Дерек де Солла Прайс и Антикитерский механизм». Скромная сумма, запрошенная Прайсом, складывалась из стоимости перелёта из Копенгагена в Афины и обратно, а также расходов на проживание в Афинах в течение 10–12 дней.

В качестве эксперта по древнегреческим надписям Прайс, по рекомендации профессора Бенджамина Меритта из Института перспективных исследований (Institute for Advanced Study, IAS) в Принстоне, привлёк к работе его коллегу, эпиграфиста Георгиоса Стамириса, который в дни визита Прайса также оказался в Афинах[116]. Стамирису удалось превысить рекорд Теофанидиса по числу прочтённых букв (350) более чем вдвое, доведя их количество до 800. На основании измерений Прайс сделал вывод, что имеющиеся в наличии фрагменты почти не деформированы, хорошо подходят друг к другу и вместе составляют полное устройство или его существенную часть. Внутренняя шкала устройства была поделена на 12 секций по 30°. В верхней части диска Стамирис смог разобрать слово ΧΗΛΑΙ (клешни) — древнее название созвездия Весы. Древнегреческий скорпион был столь суров, что под его клешни пришлось выделить отдельный знак. От надписи по левую сторону от клешней сохранилось всего две буквы, но они совпадали с буквами в слове παρθένος (дева). Логичным было предположить, что указатель (γνωμονιον) указывал на положение Солнца на небосводе. Внешняя шкала разделялась на 365 сегментов, на верхней части вслед за найденным Ремом названием месяца ΠΑΧΩΝ обнаружились две буквы (ΠΑ…) названия следующего месяца — ΠΑΩΝΙ. Следовательно, в то время как положение стрелки на внутренней шкале указывало путь Солнца среди созвездий, внешняя шкала показывала дату.

Также на шкалу вокруг диска были нанесены буквы в алфавитном порядке. Их назначение стало ясно после прочтения других надписей на лицевой стороне — буквы отсылают к перечислению различных небесных явлений. Например, A — ΑΙΓΟΚΕΡΩΣ ΑΡΧΕΤΑΙ ΑΝΑΤΕΛΛΕΙΝ (Козерог начинает восходить), P — ΑΕΤΟΣ ΕΠΙΤΕΛΛΕΙ ΕΣΠΕΡΙΟΣ (Альтаир восходит вечером) и тому подобное. Аналогичные тексты встречаются на календарях, которыми в Древней Греции пользовались с V в. до н. э., так называемых парапегмах (παράπηγμα). Более того, учёным была известна парапегма с очень похожими формулировками — её создал древнегреческий астроном Гемин Родосский, живший, как предполагается, как раз в I в. до н. э. и бывший учеником другого древнегреческого астронома — Посидония, которого Цицерон упоминает среди прочего как создателя устройства, способного «показывать движение Солнца, Луны и пяти странствующих звёзд».

И всё-таки надёжно установить предназначение механизма в этот раз Прайсу не удалось. На задней стороне устройства находились два диска, расположенные друг над другом. На каждом, судя по всему, присутствовала последовательность концентрических колец: вероятно, пять на верхнем и четыре на нижнем; каждое из колец было разделено на равные сегменты по 6°. Внутри них прочитывались ряды цифр и букв, но их значение оставалось

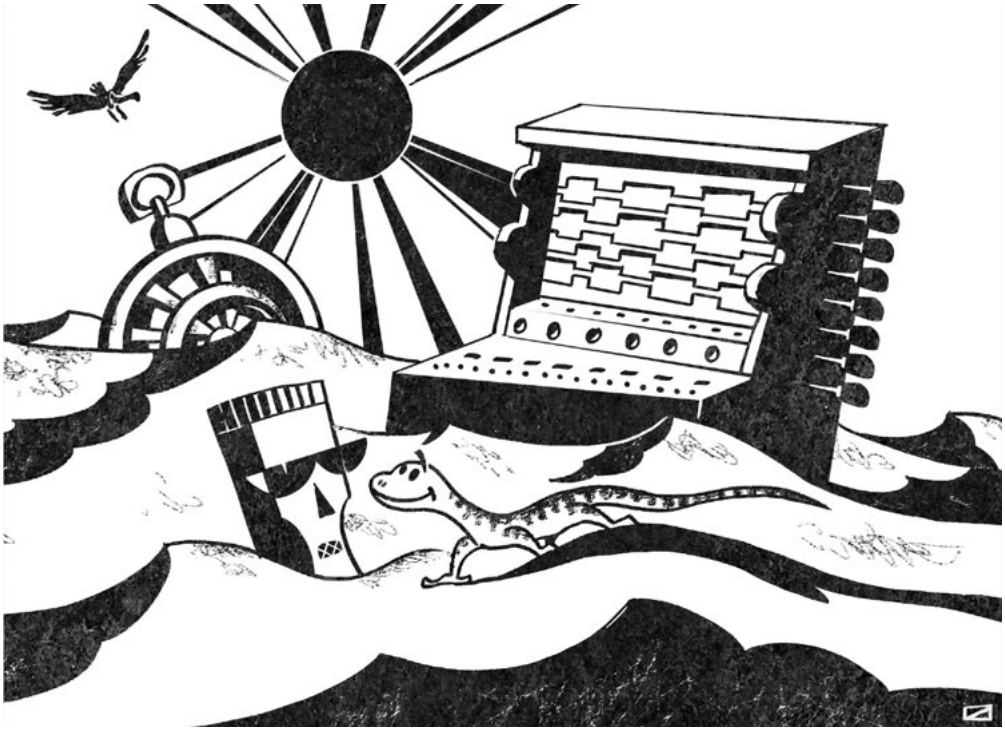
неясным. Внутри каждого из дисков с небольшим смещением от центра был вставлен маленький диск. Надписи на задней стороне сохранились хуже, чем на передней. Удалось прочесть фрагменты «два указателя», «лучи Солнца», «эклиптика», «Венера», «выступающий». Прайс предположил, что диски имели отношение к показу циклического движения Луны, Солнца и, возможно, планет, но эту гипотезу было чрезвычайно трудно подтвердить. Значительная часть механизма была сокрыта внутри окаменелых фрагментов, а без реконструкции механики устройства предположения оставались не более чем предположениями.

Значительного прорыва удалось добиться только после того, как в 1971 г. Прайс привлёк к исследованиям механизма Хараламбоса Каракалоса — главу лаборатории радиографии Афинского центра ядерных исследований. Первая серия снимков была выполнена при помощи гамма-лучей, испускаемых кусочком туллия-170, и плёнки на основе эмульсии бромида серебра. На снимках чётко просматривались невидимые ранее зубчатые колёса. Летом 1972 г. Каракалос, уже при помощи портативных рентгеновских аппаратов, выполнил несколько сотен снимков механизма с различными фокусными расстояниями, углами съёмки и временем экспозиции. Жена Каракалоса Эмили тщательно подсчитала количество зубцов на различных колёсах: Прайс полагал, что подсчётами должен заниматься человек, свободный от влияния имеющихся гипотез[117].

На основе анализа полученных снимков Прайс создал первую реконструкцию механизма, изготовив копии шестерён из картона. Изучив передаточные отношения зубчатых колёс, Прайс пришёл к выводу, что основу расчётной схемы механизма составляет так называемый Метонов цикл — промежуток времени в 6939 дней 14 часов 15 минут, используемый для согласования продолжительности лунного месяца и солнечного года в лунно-солнечном календаре. Этот цикл был предложен в 433 г. до н. э. астрономом Метоном Афинским и положен в основу древнегреческого календаря. Метонов цикл связан с приближённым (с погрешностью в несколько часов) равенством: 19 тропических лет = 235 синодическим месяцам, то есть каждые 19 лет лунный цикл завершается в тот же день солнечного года. По итогам своих исследований в июне 1974 г. Прайс опубликовал 70-страничную работу под названием «Передаточные механизмы греков»[118]. Одним из самых удивительных результатов было предположительное использование в механизме для вычисления фазы Луны дифференциальной передачи, появившейся в современной европейской технике только в XVIII в., когда её в своих часах применил лондонский мастер Джозеф Уильямсон. Предполагается, что дифференциальная передача применялась в древнекитайских «колесницах, указывающих на юг» (кит. трад. 指南車), появившихся в III в. н. э.; на такой колеснице устанавливалась фигурка человека, которая, независимо от направления движения самой колесницы, указывала вытянутой рукой на юг. И всё же это было спустя более чем три столетия после даты предположительного изготовления Антикитерского механизма.

Вслед за Прайсом эстафету в изучении устройства подхватили Майкл Райт и Алан Бромли. В их распоряжении оказался новый фрагмент механизма, обнаруженный в запасниках музея в 1976 г. (с учётом того, что следующая часть механизма будет найдена в 2005 г. также в музейных запасниках, мне кажется, что археологам следует всерьёз задуматься над организацией регулярных экспедиций именно в запасники вместо различных труднодоступных районов Земли: так можно будет не только сэкономить средства, но и существенно увеличить число находок).

Райт подверг сомнению некоторые выводы Прайса. Например, он считал, что дифференциальная передача — это явный перебор для решения такой задачи, как определение фазы Луны. Кроме того, ему казалось, что в ряде слу-



чаев Прайс подгонял число зубцов на шестернях под свои гипотезы. Бромли, объединив усилия с часовщиком из Сиднея Фрэнком Персивалем, попытался воспроизвести механизм на основе теорий Прайса, используя детали конструктора Meccano (прототипа советского металлического конструктора), и обнаружил, что модель была неработоспособной. В ходе совместной работы с Персивалем Бромли доработал реконструкцию устройства, пересмотрев функцию приводной рукоятки таким образом, что её полный поворот вокруг оси теперь соответствовал одним суткам — наиболее очевидной астрономической единице измерения. Бромли предположил, что зазор между частями механизма содержал несколько дополнительных элементов. Одним из

новшеств новой модели стала реконструкция части механизма, предназначенной для прогнозирования солнечных и лунных затмений на основании так называемого сароса (греч. σάρος), или драконического периода, — интервала времени, состоящего из 223 синодических месяцев (в среднем приблизительно 6585,3213 суток, или 18,03 тропического года), по прошествии которого затмения Солнца и Луны повторяются приблизительно в одном и том же порядке. В 1985–1989 гг. Персиваль изготовил под руководством Бромли «чистовую» реконструкцию механизма, используя в качестве материалов латунь, оргстекло и бумагу[119].

Рис. 16. Реконструкция Антикитерского механизма (1985–1989 гг.)

Райту и Бромли пришлось заново выполнить рентгенографические исследования механизма, поскольку к моменту начала их исследований хищная стихия музейных запасников уже поглотила снимки, выполненные Каракалосом. Им удалось сделать более 700 новых снимков, анализом которых занялся Бромли. Он, однако, не смог закончить эту работу из-за смерти от лимфогранулематоза в августе 2002 г.[120] Незадолго до смерти Бромли передал часть снимков Райту, который завершил новую реконструкцию в мае 2002 г., опубликовав результаты работы в Хорологическом журнале (известный технический журнал о часовых механизмах)[121]. Райт воссоздал фронтальную часть механизма: шестерни, вычисляющие движение Солнца и Луны, а также эпициклические (планетарные) шестерни для Венеры и Меркурия.

В начале 2000-х гг. работу по изучению Антикитерского механизма начала команда под руководством двух британцев, астрофизика Майка Эдмундса и математика Тони Фрита. Они исследовали устройство при помощи самого современного прибора для компьютерной томографии, созданного специально для этой задачи компанией X-Tek и использующего микрофокусный источник рентгеновского излучения. Вслед за Девой и Весами-Клешнями на зодиакальной шкале миру явился сам Скорпион (ΣΚΟΡΠΙΟΣ). Янис Битсакис и Агамемнон Целикас, работавшие с Фритом, смогли удвоить количество читаемых букв на механизме: оно превысило 2000, что составило предположительно около 10% текста, нанесённого создателями устройства на его части[122].

В 2006 г. группа Фрита публикует новую версию реконструкции механизма, а в 2008 и 2012 гг. — её дополненные варианты.

Для прогнозирования затмений в реконструкции Фрита используется «экселигмос» (греч. ἐξέλιγμος — поворот колеса) — период, равный примерно трём саросам. По прошествии одного экселигмоса затмения Луны и Солнца повторяются при сходных условиях. В отличие от сароса, экселигмос содержит не только приблизительно целое число синодических месяцев (669), драконических месяцев (726), аномалистических месяцев (717), но и приблизительно целое количество суток (19 756). Поэтому при использовании экселигмоса можно наблюдать затмения в одной и той же местности практически в одних и тех же условиях.

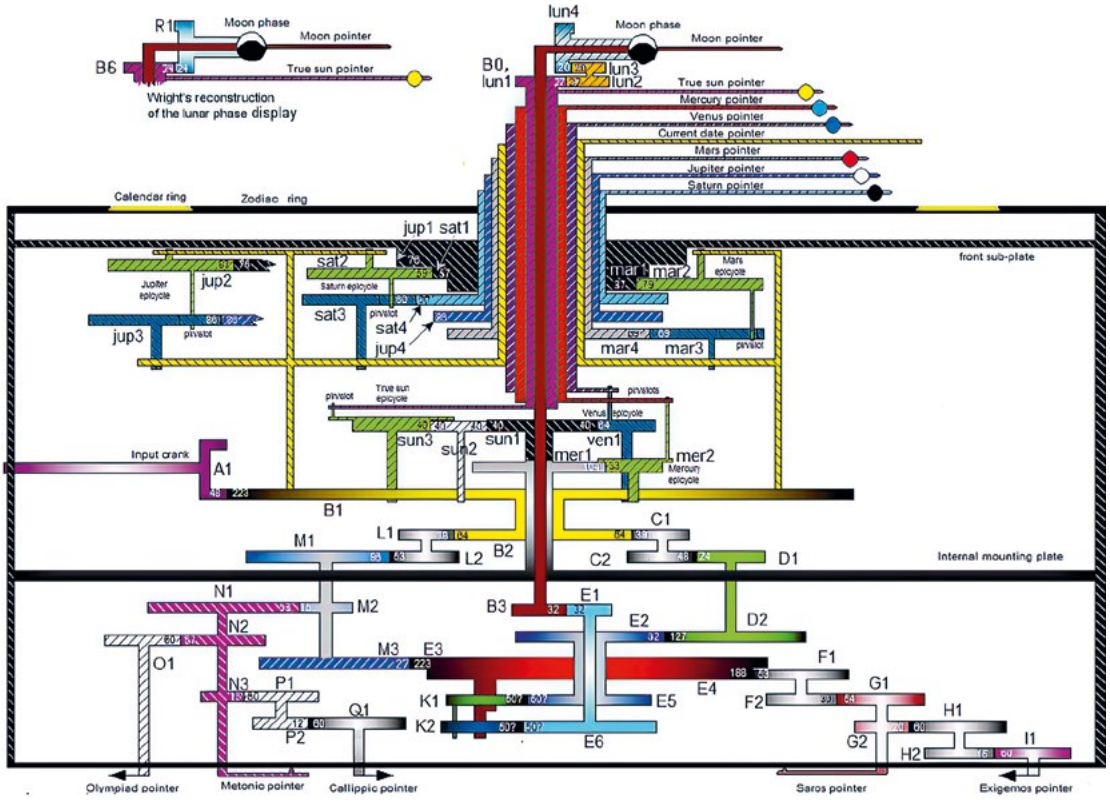


Рис. 17. Схема Антикитерского механизма, выполненная в соответствии со статьёй группы Фрита от 2012 г.

Майкл Райт стал первым исследователем, добавившим в реконструкцию механизма предположительную версию расчётной схемы для предсказания движения планет. Он предположил, что — помимо лунной аномалии — поправки, вычисляемые механизмом, должны были учитывать более базовую, солнечную аномалию (также известную под названием «первая аномалия»),

2.1.2

Антикитерский механизм

выражающуюся в неравенстве времён года. Райт включил в модель указатели для «истинного Солнца», Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна в дополнение к «среднему Солнцу» (текущему времени) и лунным указателям. Модель группы Фрита в этой части наследовала модели Райта.

В 2012 г. Джеймс Эванс, Кристиан Карман и Алан Торндайк опубликовали работу[123], в которой предлагали альтернативное решение. Оно было основано на наблюдаемой нерегулярности интервалов в надписях на шкале, расположенной на передней стороне устройства. Эта особенность могла свидетельствовать о возможном смещении оси указателя Солнца относительно центра. Подобная конструкция делает ненужным расчёт устройством солнечной аномалии и приводит к существенным упрощениям. Авторы работы предположили, что положение каждой из планет отображалось на отдельных простых шкалах, что предполагало также гораздо более простую модель части механизма, посвящённой движению планет.

В марте 2021 г. группа Тони Фрита опубликовала[124] в журнале *Scientific Reports* самую полную на текущий момент реконструкцию устройства Антикитерского механизма. В пресс-релизе Университетского колледжа Лондона, посвящённом публикации, приводятся следующие слова руководителя коллектива исследователей: *«Наша [реконструкция] — это первая модель, которая соответствует всем физическим свидетельствам и описаниям из научных надписей, выгравированных на самом механизме»*[125]. Авторы исследования создали рабочую модель устройства, механизм работы которой детально раскрыт в нескольких видеороликах, размещённых в приложении к статье.

Уникальность Антикитерского механизма часто привлекает поклонников мистики, альтернативной истории и других ненаучных направлений. Следующее механическое устройство подобного рода, дошедшее до нас, датируется V–VI вв. н. э. и изготовлено в Византии[126]. Однако картина становится куда менее странной, если учесть, что античные предметы из бронзы вообще дошли до нас в чрезвычайно малом количестве. Например, в настоящее время найдено всего около 50 бронзовых статуй, причём две из них были обнаружены на том же Антикитерском корабле. Предметы из этого дорогого в Древнем мире материала часто отправлялись в переплавку, а избежавшие подобной участи зачастую становились жертвами коррозии. У античных авторов мы неоднократно встречаем упоминания различных механических устройств, в ряде случаев чрезвычайно похожих на Антикитерский механизм, как, например, планетарии Архимеда и Посидония, упоминаемые Цицероном. Математик Папп Александрийский упоминает трактат Архимеда «Об изготовлении [небесных] сфер» [σφαιροποιΐαν][127, 128], к сожалению не дошедший до нас, который описывал принципы изготовления моделей небесного свода. Герон Александрийский описывает зубчатую передачу, изобретённую Архимедом, и устройство тахометра. В 850 г. н. э. братья Ахмад, Мухаммад и аль-Хасан ибн Муса ибн Шакир создают свою «Книгу удивительных устройств» (араб. كتاب الحيل, Китаб аль-Хияль, дословно «книга трюков»). В книге описывается около сотни различных устройств и методов их

использования — здесь можно найти описание и механических музыкальных машин, и автоматических фонтанов, и причудливых гидравлических приспособлений. В начале XI в. персидский учёный Абу Рейхан Мухаммед ибн Ахмед аль-Бируни в трактате «Книга исчерпания возможных способов конструирования астролябий» описывает календарное устройство, очень похожее на Антикитерский механизм. Есть все основания полагать существование неразрывной традиции в механике, связывающей нашу современную технику с Антикитерским механизмом через Рим, Византию, арабский мир и механизмы эпохи Возрождения. Да и сам Антикитерский механизм не возник из ниоткуда. Особенности устройства показывают его связь с теорией движения Луны Гиппарха, жившего на Родосе во II в. до н. э., с метоновой спиралью, изобретённой в колониях Коринфа (к их числу относились и Сиракузы, в которых работал Архимед), и даже с вавилонской вычислительной традицией.

Конечно, с точки зрения современных технологий Антикитерский механизм довольно примитивное устройство. Исследования Тони Фрита и Александра Джонса показывают, что ошибки, допускаемые механизмом при вычислении некоторых величин, были, по всей видимости, значительными. Например, ошибка при определении местоположения Марса могла в некоторых случаях доходить до 38°. Причиной были не технологические дефекты, а недостатки теории, положенной в основу вычислений[129]. Более точные расчёты стали возможны только после развития Птолемеем геоцентрической модели во второй половине II в., а затем открытия второго закона Кеплера в начале XVII столетия.

Тот факт, что более двух тысячелетий назад люди могли создавать аналоговые вычислительные устройства, поражает воображение и вызывает тревогу, что на смену нашей эпохе научно-технического прогресса так же могут прийти столетия нового средневековья.

2.2 Неперовы палочки

> Меня делает по-настоящему счастливой только математика, снег, лёд, числа. Для меня система исчисления подобна человеческой жизни. Сначала у тебя есть простые числа, целые и положительные. Как числа, понятные маленькому ребёнку. Но процесс познания расширяется, и ребёнок открывает для себя сильные желания. Знаешь математический эквивалент желания? Отрицательные числа. Формализация ощущения, что тебе чего-то недостаёт. Затем ребёнок открывает для себя промежутки: между камнями, между людьми, между числами. И так появляются дроби. Но это похоже на безумие, потому что на этом всё не останавливается, никогда не останавливается. И есть числа, которые мы не можем даже начать понимать. Математика — это огромный, безграничный пейзаж: ты идёшь к горизонту, который всегда отступает. Как Гренландия.
>
> Питер Хёг. *Смилла и её чувство снега* *

Абак, счёты и их аналоги неплохо справлялись с задачей облегчения счёта во времена Античности, но уже не могли удовлетворять потребностям производства, торговли и государственного управления в Новое время. Большие трудности при вычислениях вызывали умножение и деление больших чисел. Шотландскому математику Джону Неперу, 8-му лэрду Мерчистона [8th Laird of Merchiston], пришла в голову замечательная идея: заменить умножение на сложение, сопоставив при помощи специальных таблиц геометрическую и арифметическую прогрессии. При этом деление будет заменяться на гораздо более простое вычитание.

Впрочем, нельзя с уверенностью сказать, что эта идея возникла у Непера на ровном месте. Некоторые мысли витают в воздухе, а первооткрыватели всегда стоят на плечах великих предшественников. Не исключено, что Непер был знаком с написанной Михаэлем Штифелем в 1544 г. книгой «Полная арифметика» (Arithmetica integra), в которой была выражена идея логарифма: сопоставление умножения в одной шкале (базовой) сложению в другой (логарифмической). Штифель, однако, отказался развивать свою идею. *«Тут можно было бы написать целую книгу об удивительных свойствах чисел, но*

* Пер. Е. Красновой.

я должен здесь остановиться и пройти мимо с закрытыми глазами», — писал он[130].

Впрочем, ещё задолго до Штифеля математики предпринимали шаги в этом направлении. Например, индийский математик Вирасена построил таблицы логарифмов для оснований 2, 3 и 4. Заслугой Штифеля был переход от целых показателей степени к произвольным рациональным. До него вплотную к этой идее подступали в XIV в. Николай Орем и в XV в. Никола Шюке. Фактически Штифелю для создания применимых на практике таблиц логарифмов не хватило всего одного элемента — десятичных дробей[131], которые, хотя и были изобретены более чем за 1000 лет до Штифеля, получили широкое распространение в Европе только после появления сочинения Симона Стевина «Десятая» (De Thiende, 1585). Таким образом, формальная пальма первенства в вопросе создания логарифмов досталась Неперу.

В 1614 г. Непер опубликовал в Эдинбурге книгу «Описание удивительной таблицы логарифмов» (Mirifici Logarithmorum Canonis Decriptio). Из 146 страниц этого труда 90 занимали таблицы логарифмов синусов, косинусов и тангенсов с точностью до седьмого знака для углов от 0 до 90°, с шагом 1′. В книге также содержалось краткое описание логарифмов и их свойств. Следует, однако, отметить, что все значения таблиц Непера содержали вычислительную ошибку после шестого знака. Впрочем, это не помешало революционной методике вычислений стать чрезвычайно популярной. Впоследствии составлением и уточнением логарифмических таблиц занялись многие европейские математики, включая Иоганна Кеплера. Книга Непера переиздавалась пять раз и была переведена на многие языки.

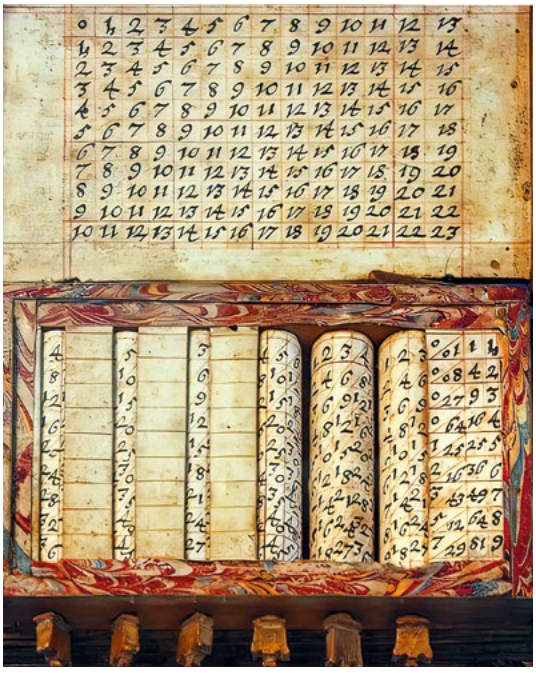


Рис. 18. Палочки Непера

Помимо создания таблиц логарифмов Непер разработал оригинальное вычислительное устройство — палочки Непера (Napier's Bones), или не́перовы палочки, — призванное облегчить решение задач умножения и деления (с помощью некоторых ухищрений это приспособление можно использовать также для извлечения квадратных и кубических корней). В 1617 г. он опубликовал работу под названием «Рабдология, или Две книги счёта с помощью палочек» (Rabdologiae, seu Numerationis per Virgulas Libri Duo), в которой дал описание устройства и методов его применения. Слово «рабдология» Непер произвёл от греческих слов ραβδος (рабдос) — «стержень, палочка» и λογος

2.2

Неперовы палочки

(логос), в том числе означающего вычисление, счёт. Стало быть, рабдология означает счёт при помощи палочек.

Интересно, что способ вычисления, заложенный в неперовых палочках, никак не связан с открытыми Непером логарифмами. В его основе лежит техника умножения, предложенная Матракчи Насухом и являющаяся, в свою очередь, модификацией древнего метода решётки.

Точно неизвестно, где и когда изобрели решётчатое умножение. Первые случаи его употребления фиксируются в арабских и европейских источниках с конца XIII в. Способ решётки называли также индийским, мусульманским или «умножением в клеточку». В Италии его назвали «джелозия», или «решётчатое умножение» (*gelosia* в переводе с итальянского — жалюзи, решётчатые ставни). И в самом деле, фигуры из чисел, появляющиеся в процессе умножения, чем-то похожи на ставни-жалюзи, которыми закрывали от солнца окна венецианских домов[132].

Матракчи Насух — весьма интересная личность в истории науки. Османский учёный, историк и миниатюрист * боснийского происхождения, он начал свою карьеру с того, что попал в столицу Блистательной Порты как часть «девширме» **.

Несмотря на то что мусульмане не подлежали девширме, некоторые небогатые мусульманские родители усматривали в подобной практике возможность для сыновей сделать карьеру. В таких случаях они предлагали соседям-христианам во время набора по девширме сдать собственного ребёнка под видом их сына[133]. Для боснийских мусульман было даже введено официальное исключение, предоставляющее им право отдавать детей по девширме[134]. Именно таким образом Насух и попал в пехотный корпус янычар, где овладел навыками фехтования и стрельбы. Развитый интеллект помог Насуху освоить несколько иностранных языков, что позволило ему попасть на флот после обучения в Эндеруне — дворцовом центре подготовки управленческих кадров.

Прозвище Матракчи, или Матраки, Насух получил в честь изобретённой им игры матрак — боёв на обтянутых кожей деревянных палках (исполняющих роль меча) и с деревянными же, также покрытыми кожей щитами. Матрак (в переводе с турецкого значит «удивительный») получил широкое распространение в Османской империи, на протяжении веков в него играли не только солдаты, но даже султаны[135]. Османский путешественник Эвлия Челеби в своей «Книге путешествий» (Seyahatnâme) утверждал, что султан Мурад IV был мастером игры в матрак[136].

* Османская миниатюра — форма искусства в Османской империи, разновидность живописи, изображающая сцены войн, охоты, значимых для двора и страны событий, уклад и образ жизни людей.

** «Девширме» («налог кровью») — система принудительного набора мальчиков из христианских семей для их последующего воспитания и дальнейшей службы в роли «капыкулу» (*kapıkulları*, «государевы рабы») — лиц рабского статуса на государственной и военной службе. Большая часть чиновников и военных Османской империи в XV–XVI вв. состояла именно из призванных по девширме лиц.

В 1533 г. Насух завершил и преподнёс султану Сулейману Великолепному труд под названием «Трактат о вычислениях» (Umdetü'l Hisâb)[137]. Работа представляла свод необходимых для счетоводов и студентов XVI в. математических знаний. К ним относились арабский алфавит, индийские цифры, правила сложения, вычитания и деления, денежный учёт, единицы измерения, принципы учёта недвижимости и налогов, решения задач о скорости движения и так далее. Среди прочего описывается метод умножения на бумаге, наиболее близкий к использованному в неперовых палочках полвека спустя.

Палочки Непера — своеобразное промежуточное звено, заполняющее пробел между вычислениями на бумаге и механическими вычислительными машинами. Эффект, произведённый их появлением, оказался весьма существенным. Родившийся через десять лет после смерти Непера Джозеф Моксон, гидрограф английского короля Карла II, издатель математических книг и карт, создатель первого английского математического словаря и первого детального руководства по методам печати, в предисловии к одной из своих книг поместил хвалебное стихотворение, посвящённое неперовым палочкам:

Religious Romanists strongly maintain
That by the Bones of their dead Saints are wrought
Wonders; 'tis strange! Yet they the purses drain
Of them that to their fond Belief are brought.

Bit we'l regret those fancies, let them go
With their dead Trump'ry, here's Lord Napier's Bones
Which Ile ensure you will more wonders show
Than all those Reliques they count holy ones.

Canst thou but Add, then thou maist Multiply,
And if Subtract, 'twill teach thee to Divide,
And likewise to Gauge Vessels suddenly,
And measure both Glass, Board and Land beside[138].

Религиозные католики уверенно утверждают,
Что кости их умерших святых творят
Чудеса; это странно! Тем не менее они истощают кошельки
Тех, которые привержены их любимой вере.

Немного пожалеем об этих фантазиях, оставим их
С их мертвечиной, вот костяшки лорда Непера,
Которые наверняка покажут вам больше чудес,
Чем все те реликвии, которые они [католики] считают святыми.

Если можешь складывать, то сможешь умножать,
А если вычитать — они научат делить,
И подобны мерным сосудам внезапно,
И измерят и стекло, и доски, и землю рядом.

2.3 Машина Шиккарда и паскалина

— Зачем эти колокольчики? Зачем молоточки? Зачем валик с крючками? — спрашивал Миша у папеньки.

А папенька отвечал:

— Не скажу тебе, Миша; сам посмотри попристальнее да подумай: авось отгадаешь. Только вот этой пружинки не трогай, а иначе всё изломается.

Владимир Одоевский. *Городок в табакерке*

В течение более чем трёх столетий специалисты по истории математики были уверены, что первый в истории механический калькулятор изобрёл и изготовил Блез Паскаль — французский математик, механик, физик, литератор и философ. Однако всё изменилось в 1957 г., когда на конференции, проходившей в Математическом институте Обервольфаха (ФРГ), Франц Хаммер, директор Кеплеровского научного центра в Штутгарте, выступил с сенсационным докладом. Хаммер сообщил, что проект первой счётной машины появился в середине 1623 г. и автором устройства был Вильгельм Шиккард.

Своё открытие Хаммер совершил практически случайно. Работая в штутгартской библиотеке, он обнаружил фотокопию эскиза какого-то вычислительного устройства. Хаммер установил, что обнаруженный эскиз — это потерянное приложение к письму профессора Тюбингенского университета Вильгельма Шиккарда, адресованному математику и астроному Иоганну Кеплеру. В письме Шиккард детально описывал счётную машину и упоминал чертёж.

Шиккард родился 22 апреля 1592 г. в городе Херренберге (герцогство Вюртемберг, сейчас часть федеральной земли Баден-Вюртемберг, Германия). В 17 лет получил в Тюбингенском университете степень бакалавра, а через два года — магистра. С 1617 г. он преподаёт восточные языки в своей *alma mater* и получает должность профессора кафедры. В университете Шиккард знакомится с Кеплером, который рекомендует ему заняться математикой. Следуя этому совету, Шиккард вновь достигает успеха: в 1631 г. становится профессором математики и астрономии Тюбингенского университета.

Вильгельм Шиккард был энциклопедистом своего времени: его перу принадлежат трактаты о языках, математике, астрономии, оптике и метеорологии.

Он успешно освоил картографию, гравировку по дереву и металлу, механику, вёл переписку с французскими, голландскими и итальянскими учёными. К сожалению, знаний, доступных человечеству в XVII в., оказалось недостаточно для того, чтобы защитить Шиккарда от холеры, беспощадно забравшей жизнь учёного и его семьи в 1635 г.

Приблизительно в 1621 г. Шиккард построил механизм из зубчатых колёс, предназначенный для выполнения упрощённого умножения, задействованного в способе расчёта орбиты Луны, предложенном Иоганном Кеплером. В двух письмах, написанных в 1623 и 1624 гг., Шиккард сообщает Кеплеру об изобретении и создании устройства, которое назвал *arithmeticum organum* (арифметическим инструментом). Позже Шиккард использует название *Rechenuhr* (счётные часы). Машина была предназначена для упрощения выполнения сложения, вычитания, умножения и деления.

Францу Хаммеру удалось найти в библиотеке Штутгарта ещё один чернильный набросок машины Шиккарда, а также указания Иоганну Пфистеру — механику, изготовлявшему машину. Основываясь на материалах, найденных Хаммером, учёные Тюбингенского университета в начале 1960-х гг. смогли построить рабочую модель машины Шиккарда.

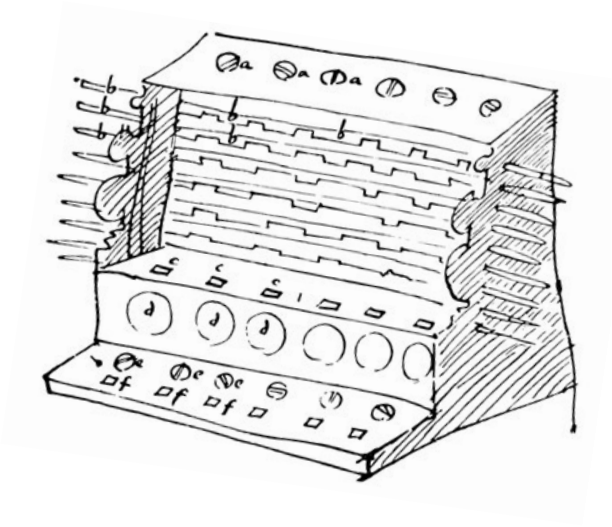


Рис. 19. Машина Шиккарда

К сожалению, нет уверенности в том, что оригинальная машина Шиккарда была полностью функциональной. Доктор Бруно фон Фрайтаг-Лорингофф — автор первой реконструкции машины — был вынужден внести небольшие изменения в её конструкцию, чтобы сделать машину полностью работоспособной.

Во втором письме Шиккарда от 25 февраля 1624 г. сообщается, что незавершённый экземпляр машины, предназначенный для Кеплера, сгорел во время ночного пожара: *«...Поэтому я пишу тебе, чтобы отвести душу, так как переживаю потерю очень тяжело и не имею времени быстро создать новую машину»*. Первый же экземпляр машины Шиккарда так и не был найден[139].

Интересно, что Хаммер не был первым из исследователей, обративших внимание на изобретение Шиккарда. В 1718 г. один из первых биографов Кеплера — немец Михаэль Готтлиб Ганш — опубликовал книгу писем Кеплера, в которую входят и два письма Шиккарда. Более того, на полях второго письма содержится пометка издателя: *Schickardi machina arithmetica* (арифметическая машина Шиккарда).

2.3

Машина Шиккарда и паскалина

В 1899 г. «Штутгартский геодезический журнал» (Stuttgarter Zeitschrift für Vermessungswesen) опубликовал перепечатку старой статьи немецкого учёного Иоганна фон Боненбергера. Среди прочего автор статьи пишет: *«Странно, что никто не признаёт, что Шиккард изобрёл счётную машину. В 1624 г. он заказал копию для Кеплера, но она была уничтожена ночным пожаром»*.

В 1912 г. журнал «Новости Геодезической ассоциации Вюртемберга» (Nachrichten des Württembergischen Vermessungstechnischen Vereins) опубликовал набросок и записи о машине из Вюртембергской земельной библиотеки (Württembergischen Landesbibliothek)[140].

Скорее всего, Паскаль не был знаком с работой Шиккарда, поскольку конструктивно их устройства различаются довольно существенно. Паскаль использовал в конструкции коронные шестерни, в то время как Шиккард ограничился зубчатыми колёсами, и, для того чтобы исключить заедание механизма при расчётах, был необходим какой-то аналог анкерного механизма. Машина Шиккарда куда больше напоминает устройство, созданное сэром Сэмюэлом Морландом в 1660-е гг.

В любом случае триумфальное шествие механических калькуляторов началось именно с машины Паскаля.

Блез Паскаль родился 19 июня 1623 г. во французском городе Клермон-Ферран. Его отец — Этьен Паскаль — происходил из богатой семьи. Дед Паскаля по отцовской линии — Мартин Паскаль — занимал должность казначея Франции, а также королевского советника и финансового инспектора в округе Рьом и, кроме того, был личным секретарём жены короля Генриха III. Получив в Парижском университете образование в области права, отец Паскаля вернулся в родной Клермон-Ферран, где приобрёл чин королевского советника. В 1625 г., уже после рождения Блеза, его отец получает престижный пост президента Высшего податного суда провинции. Мать Блеза Паскаля — Антуанетта Паскаль — дочь сенешаля * Оверни (одна из провинций Франции) — была моложе мужа на восемь лет. Она умерла, когда маленькому Блезу было три года. В 1631 г. семья Паскаль (отец, Блез и две его маленькие сестры — Жаклин и Жильберта) перебирается в Париж[141, 142].

Талант Блеза развился не на пустом месте: Этьен Паскаль и сам неплохо разбирался в математике. В числе его друзей были такие выдающиеся математики своего времени, как Марен Мерсенн и Жерар Дезарг, основатель проективной геометрии. Именно в честь Этьена Паскаля названа знаменитая «улитка Паскаля» — открытая им алгебраическая кривая. Также отец Блеза был назначен кардиналом Ришельё в комиссию по оценке способа определения долготы, предложенного Жан-Батистом Мореном.

Этьен Паскаль тщательно подошёл к задаче обучения сына. Он составил и детально продумал план обучения, руководствуясь соображениями о том, что сложность изучаемого предмета должна соответствовать уровню развития умственных сил ребёнка в его возрасте. В соответствии с планом начиная

* Сенешаль — глава региональной системы правосудия во Франции в XVII в.

с восьми лет Блез должен был получать общие знания о языках и грамматике, латинский и греческий следовало изучать после 12 лет, а математику — с 15 или 16 лет. Однако под влиянием проявившегося у сына интереса к геометрии и продемонстрированных им неожиданных успехов отец был вынужден отказаться от первоначального плана, поэтому математическое образование юного Паскаля началось в 12 лет[143].

Отцу Блеза по роду службы приходилось часто заниматься расчётами. По всей видимости, именно помогая отцу, Блез впервые задумался над созданием вычислительного устройства, которое могло бы облегчить осуществление расчётов. В 19 лет он начал создание своей первой суммирующей машины — паскалины. Слагаемые, уменьшаемые и вычитаемые числа вводились в машину при помощи соответствующих поворотов специальных колёс. На каждое из них, соответствовавшее одному десятичному разряду, были нанесены деления от 0 до 9 (некоторые паскалины также содержали колёса размерностью шесть, двенадцать и двадцать единиц для подсчёта денежных единиц: 1 ливр = 20 су, 1 су = 12 денье — или единиц расстояния: 1 туаз = 6 парижским футам, 1 парижский фут = 12 дюймам, 1 дюйм = 12 линиям). При завершении полного оборота колесо переносило единицу в соседний разряд, сдвигая соседнее колесо на одну позицию. Первая паскалина могла оперировать с пятизначными числами, однако позднее Паскаль создал также шести-, восьми- и даже десятиразрядную версии машины. Результат операции появлялся в окошечках, расположенных в верхней части металлического корпуса. Хотя вращение колёс в паскалине было возможно только в одном направлении, что исключало возможность прямого использования отрицательных чисел, вычитание можно было осуществлять при помощи дополнений, для этого оператору нужно было при наборе числа переместить

Рис. 20. Паскалина

полоску-ширму, прикрывающую соответственно верхнюю или нижнюю часть окошек паскалины.

В 1645 г. Блез преподнёс канцлеру Сегье готовую модель машины, а в 1649 г. получил королевскую привилегию на счётную машину: запрещалось копирование модели Паскаля, а также создание без его разрешения любых разновидностей суммирующих машин и, кроме этого, продажа счётных машин иностранцами в пределах Франции. Нарушитель должен был заплатить штраф размером 3000 ливров, при этом указанная сумма разделялась на три равные части: первая поступала в казну, вторая — в парижскую больницу, а третья — Паскалю либо его правопреемнику. До 1652 г. под наблюдением Паскаля было создано около 50 прототипов и 20 готовых машин. Девять паскалин сохранилось до наших дней (правда, одна из них была собрана уже в XVIII в. из неиспользованных деталей). Семь из девяти дошедших до нас машин имеют персональные имена — например, единственная десятиразрядная паскалина носит имя «Королева Польши». При жизни создателя было продано примерно 10–15 паскалин[144]. Патент на машину не принёс богатства её создателю. Большая технологическая сложность и высокая стоимость машины (она стоила 500 ливров, что в пересчёте через стоимость серебра даёт нам современную цену порядка 3000 долларов США[145, 146]) в сочетании с ограниченными вычислительными возможностями препятствовали её повсеместному распространению. Паскалю удалось продать лишь около дюжины устройств. Однако счётная машина Паскаля послужила прототипом для более поздних и совершенных счётных приспособлений.

Первым коммерчески успешным механическим вычислительным устройством стал арифмометр, созданный в 1820 г. французским предпринимателем Шарлем де Кольмаром[147]. Арифмометр был прямым наследником счётной машины Лейбница, конструкция которой, в свою очередь, представляла собой расширенную и усовершенствованную версию паскалины[148].

2.4 Машины Бэббиджа

> В отличие от всего остального в «Гаррике», установленная на четырёх брусках красного дерева вычислительная машина выглядела вполне прилично. Пол и потолок над и под ней были аккуратно выскоблены и побелены. Паровой вычислитель — штука тонкая, с характером, если ты не намерен его холить, уж лучше вообще не покупай. В отсветах калильной лампы причудливой колоннадой тускло поблескивали латунные, усеянные круглыми выступами цилиндры, многие десятки цилиндров. Снизу и сверху их удерживали массивные, тщательно отполированные стальные пластины, вокруг сверкали десятки рычагов и храповиков, тысячи стальных шестерёнок. От машины пахло льняным маслом.
>
> Сверкающий, непостижимый механизм завораживал Сибил, вызывал у неё странное, сродни голоду или алчности, чувство. Так можно относиться… ну, скажем, к красивой породистой лошади. Ей хотелось иметь… нет, не обязательно саму эту вещь, но какую-нибудь над ней власть.
>
> Уильям Гибсон, Брюс Стерлинг. *Машина различий*

2.4.1 Юность Бэббиджа. Проект де Прони как источник вдохновения

Чарльз Бэббидж родился в Лондоне в 1791 г. в семье банкира Бенджамина Бэббиджа и его жены Элизабет Бэббидж (Тип). Два маленьких брата Бэббиджа, родившиеся в 1794 и 1796 гг., умерли во младенчестве, и только сестра, Мэри Энн, родившаяся в 1798 г., выжила и даже смогла пережить Чарльза[149]. Своё образование Бэббидж начал в возрасте восьми лет в частной школе в Альфингтоне, однако здоровье мальчика было слабым, и учебную нагрузку старались ограничивать[150]. После начальной школы Чарльз поступает в среднюю школу преподобного Стивена Фримена, также известную под названием «Холмвуд» или «Академия Холмвуда». Это было небольшое учебное заведение на 30 учеников, расположенное в красном кирпичном здании в верхней части Бейкер-стрит в Энфилде (не путать с одноимённой улицей в районе Мэрилебон, на которой сэр Артур Конан Дойл разместил обиталище Шерлока Холмса)[151].

2.4.1

Юность Бэббиджа. Проект де Прони как источник вдохновения

Найденная в школьной библиотеке книга Джона Уорда «Путеводитель молодого математика» (Ward's Young Mathematician's Guide) произвела особенно сильное впечатление на юного Бэббиджа. Его интерес к математике был очевиден и зашёл так далеко, что вместе с одним из однокашников Чарльз занимался ею самостоятельно перед началом школьных уроков. Позднее он продолжил занятия под руководством священника-тьютора недалеко от Кембриджа. Эти занятия продолжались в течение нескольких лет, и, наконец, перед поступлением в Кембриджский университет Бэббидж провёл некоторое время в Тотнесе, где занимался классическими языками под руководством оксфордского наставника. Будучи страстно увлечённым алгеброй, он проводил досуг, изучая все математические работы, которые попадали в его руки. К тому времени, когда Чарльз отправился в Кембридж, он уже был вполне сформировавшимся математиком, знакомым с «Принципами аналитических вычислений» Роберта Вудхауза[152], «Теорией аналитических функций» Жозефа Луи Лагранжа[153], «Основами анализа» Марии Гаэтаны Аньези[154] и другими работами по исчислению «флюксий» (устаревшее название производных).

В апреле 1810 г. Бэббидж поступает в кембриджский Тринити-колледж, а спустя два года переходит в колледж Питерхаус. Здесь он активно включается в полную энергией студенческую жизнь: играет в шахматы, участвует в ночных шестипенсовых играх в вист, периодически пропускает лекции и церковные службы ради прогулок по реке с друзьями. В Кембридже Бэббидж знакомится с сыном знаменитого астронома Уильяма Гершеля Джоном, который поступил в Колледж Святого Иоанна в 1809 г., и вскоре они становятся близкими друзьями. Бэббидж придерживался радикальных взглядов: он восхищался наполеоновской Францией (с которой Британия находилась в состоянии войны), осуждал догматизм, проявлявшийся в подчинении университетской жизни религиозным принципам, сетовал на отсутствие восприимчивости к континентальным теориям в области математики. Чарльза расстраивало, что университетская программа мало прибавляет к имевшимся у него знаниям в области математики, поэтому в своём образовании он больше опирался на программу самостоятельного обучения, основой которой стало изучение трудов иностранных математиков.

Вместе с Джоном Гершелем и Джорджем Пикоком (в будущем — известным математиком) Бэббидж переводит на английский язык «Трактат по дифференциальному и интегральному исчислению» (Traité du calcul différentiel et intégral) Сильвестра Лакруа и отстаивает превосходство нотации дифференцирования Лейбница (dx/dt) перед ньютоновской ($\dot{x}$), в то время считавшейся в Англии своеобразной научной святыней.

Бэббидж был звездой Питерхауса, однако в 1814 г. получил диплом бакалавра без отличия (Poll degree), а в 1817-м — степень магистра искусств (Master of Arts): в ходе публичных диспутов, являвшихся частью предварительного отбора для получения диплома с отличием, Бэббидж отстаивал утверждение о том, что бог является материальным агентом. Ведущий

диспута преподобный Томас Джефсон объявил это суждение богохульным и отверг кандидатуру Бэббиджа[155]. Не до конца ясно, был ли в результате Бэббидж не допущен к экзамену на степень с отличием или же сам не захотел принимать в нём участие, однако считается, что именно этот эпизод привёл Чарльза к разочарованию в кембриджском сообществе и уходу из университета. Впрочем, позже Бэббидж с теплотой вспоминал годы, проведённые в Кембридже[156].

Трагикомической подробностью биографии обидчика Бэббиджа стало то, что в 1823 г. святоша предстал перед судом по обвинению в содомии, и лишь высокий социальный статус позволил ему избежать сурового наказания[157, 158].

В 1816 г. Бэббидж был избран членом Лондонского королевского общества, а в 1820-м — членом Королевского общества Эдинбурга. Он участвовал в создании Королевского астрономического общества в 1820 г. и занимал посты секретаря (1820–1824), а затем — вице-президента, иностранного секретаря и члена совета. Немногое известно о семейной жизни Бэббиджа. Он женился на Джорджине Уитмор в 1814 г., и у них было восемь детей, четверо из которых умерли в детстве. 1827 год стал трагическим годом для Бэббиджа: он потерял отца, жену и двоих детей, его собственное здоровье было серьёзно подорвано. После смерти Джорджины Бэббидж более не вступал в брак[159].

В 1819 г. Бэббидж впервые посетил Париж, где познакомился с несколькими ведущими членами Французской академии наук, в том числе с математиками Пьером-Симоном Лапласом и Жозефом Фурье, с которыми его связала крепкая дружба. По всей видимости, именно во время этого визита Бэббидж узнал о великом французском проекте по созданию логарифмических и тригонометрических таблиц, организованном бароном Гаспаром де Прони, и именно этот проект вдохновил Бэббиджа на дело всей его жизни.

Де Прони начал свой проект в 1790 г., вскоре после Французской революции. Новое правительство планировало реформировать многие из древних институтов Франции и, в частности, создать справедливую систему налогообложения имущества. Для этого были необходимы современные карты Франции, создание которых было поручено де Прони, назначенному главой Кадастрового бюро Франции. Его задача была усложнена тем, что правительство одновременно решило заменить старую королевскую систему мер и весов путём введения новой метрической системы. Это потребовало от Бюро создания полного набора тригонометрических и логарифмических таблиц для французского кадастра. На тот момент это был самый крупный проект по изготовлению таблиц, который когда-либо знал мир, и де Прони решил положить в его основу принципы фабричного производства. Он принял за основу самый известный экономический текст своего времени — «Богатство народов» Адама Смита, опубликованный в 1776 г. В нём Смит отстаивал принцип разделения труда, который проиллюстрировал на примере производства булавок. Смит демонстрировал, что создание булавки можно разделить на несколько отдельных операций: нарезку проволоки на части, формирование головки булавки, заточку, полировку, упаковку и так далее.

2.4.1

Юность Бэббиджа. Проект де Прони как источник вдохновения

Специализация каждого работника на какой-либо одной операции приводила к росту производительности труда по сравнению с ситуацией, когда один человек выполнял все операции сразу.

Де Прони решил применить тот же метод в стоящей перед ним задаче — то есть в некотором смысле организовать производство логарифмов на тех же принципах, на которых было основано производство булавок. Де Прони разделил свою «фабрику по производству таблиц» на три отдела: первый состоял из нескольких выдающихся математиков, в число которых входили Адриен Мари Лежандр и Лазар Карно. В задачи этого отдела входил выбор математических формул для расчётов. Им подчинялся небольшой второй отдел, включавший контролёров, своеобразных «менеджеров среднего звена», которые организовали вычисления и занимались сведением результатов, подготавливая их к печати. И наконец, третий и самый большой отдел состоял из 60–80 людей-вычислителей. Вычислители использовали в своей работе «метод разделённых разностей», основанный на выполнении всего лишь двух основных операций: сложения и вычитания, что не требовало от них ни специальных математических знаний, ни высокой квалификации. По большей мере вычислители были бывшими парикмахерами, потерявшими работу из-за того, что причёски аристократии стали одним из самых ненавистных символов старого режима[160].

Понять принцип метода разделённых разностей несложно, это вам не бином Ньютона… Хотя подождите, упс… На самом деле это он самый и есть, а точнее — это метод, при помощи которого можно находить коэффициенты ньютоновского интерполяционного полинома. Как самостоятельный подход метод разностей оформился в работах Брука Тейлора, но в его основе лежали ранее известные закономерности. Мы, впрочем, не будем здесь погружаться в пучины математики и даже спорить о том, кому в данном случае принадлежит приоритет в изобретении этого метода — Бруку Тейлору, Исааку Ньютону или Блезу Паскалю[161]. Ограничимся небольшим примером. Предположим, что мы хотим рассчитать последовательные значения функции $y = x^3$. Давайте посмотрим, как начинается этот ряд: при x, начинающемся с нуля, y принимает последовательно следующие значения: $0^3 = 0$, $1^3 = 1$, $2^3 = 8$, $3^3 = 27$, $4^3 = 64$, $5^3 = 125$ и так далее.

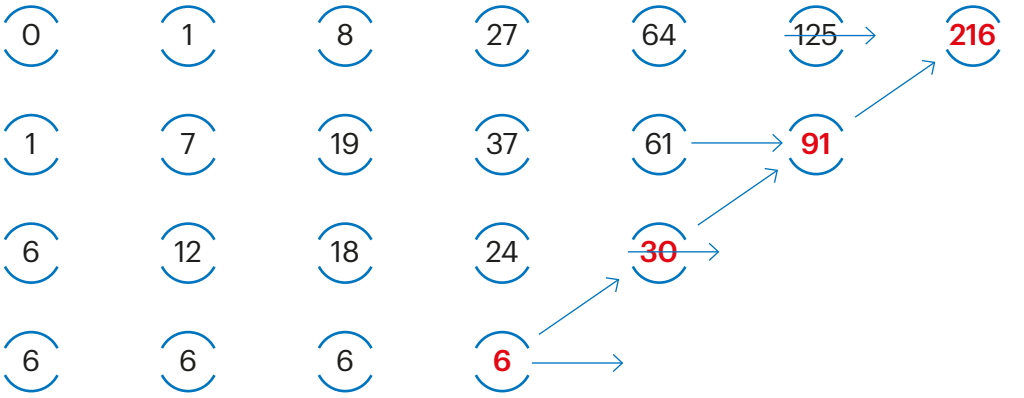
Теперь посчитаем разности между соседними числами в этой последовательности (так называемые разности первого порядка).

Теперь по аналогии рассчитаем разности второго порядка, находя разности между соседними числами в полученной нами на прошлом шаге последовательности разностей первого порядка.

Теперь вычислим разности третьего порядка.

Мы видим, что разности третьего порядка постоянны. Как бы долго мы ни продолжали исходную последовательность, в данном случае разности третьего порядка будут неизменно представлять собой шестёрки. Если бы исходный многочлен имел степень 4, например $y = x^4$ или $y = 2x^4 + 3x^2 + 5x + 1$, то нам пришлось бы использовать уже четыре порядка разностей, и в четвёртом порядке мы снова получили бы неизменные значения. Используя эту закономерность, несложно теперь продолжить исходную последовательность. Поскольку четвёртой разностью третьего порядка у нас будет всё та же шестёрка, мы можем вычислить пятую разность второго порядка: $24 + 6 = 30$.

Теперь шестую разность первого порядка: 61 + 30 = 91 и, наконец, седьмой элемент исходной последовательности: 125 + 91 = 216. И действительно, $6^3 = 216$.



2.4.1

Юность Бэббиджа. Проект де Прони как источник вдохновения

Расчёты в рамках проекта де Прони заняли около десятилетия, в 1801 г. таблицы были готовы к печати, однако их изданию помешала череда финансовых и политических кризисов, в которую погрузилась Франция начала XIX в. Необходимая для печати сумма средств так никогда и не была найдена, и единственным результатом проекта, доступным Бэббиджу в 1819 г., стала рукописная версия таблиц, хранившаяся в библиотеке Французской академии наук.

Доработка таблиц «Морского альманаха». Первая модель разностной машины 2.4.2

В 1820 г., вернувшись в Англию, Бэббидж вместе с Джоном Гершелем становятся участниками собственного проекта, связанного с табличными расчётами. Только что основанное Астрономическое общество поручает им заняться улучшением астрономических таблиц «Морского альманаха» (*The Nautical Almanac*). Это издание вело свою историю с 1766 г., когда британское правительство поручило его ежегодный выпуск королевскому астроному Нэвилу Маскелайну. Маскелайн неслучайно стал руководителем одного из первых в мире постоянных проектов по подготовке математических таблиц[162] (первым подобным проектом был всё же французский ежегодник «Знание времени или движение звёзд» (Connaissance des Temps ou des mouvements célestes))[163]. Именно он был одним из авторов «метода лунных расстояний» (Маскелайн основывался на работах, прежде всего, Тобиаса Майера, уже упоминавшегося в этой книге Жан-Батиста Морена, а также, по всей видимости, Никола Луи де Лакайля и Жозефа Жерома Лефрансуа де Лаланда[164]), позволяющего вычислять гринвичское время на основании измерения угла между

Луной и другими небесными телами. Зная гринвичское время, можно затем достаточно точно определить географическую долготу без использования спутников GPS или ГЛОНАСС, которые в конце XVIII в. ещё не были запущены на орбиту[165].

Конечно, гринвичское время можно было узнать при помощи корабельного хронометра, однако такие устройства в конце XVIII — начале XIX в. только начинали входить в обиход и были ещё слишком дороги или недостаточно точны: механические часы трудно сделать точными в условиях морской качки. Во многом благодаря литературному таланту писательницы Давы Собел с её монументальным бестселлером «Долгота» (а затем и одноимённому телесериалу) сформировался образ Маскелайна-злодея, антагониста Джона Гаррисона — гениального изобретателя первого морского хронометра, позволившего определять долготу на корабле в море с точностью до 1°. Однако действительность была куда более прозаичной — «Морской альманах» и метод лунных расстояний вплоть до второй половины XIX в. оставались более практичной и дешёвой альтернативой дорогим и капризным механическим устройствам[166]. Прозванный «Библией моряка»[167] альманах Маскелайна сделал навигацию гораздо точнее, однако точность таблиц, публиковавшихся в нём, часто оставляла желать лучшего: она сильно зависела от аккуратности вычислений, выполняемых вручную людьми, к тому же разделёнными географически.

Бэббидж и Гершель начали свою работу над доработкой таблиц «Морского альманаха» с того, что выбрали необходимые для вычислений формулы и распределили расчёты среди клерков. Чтобы уменьшить число ошибок, каждое из вычислений осуществлялось параллельно двумя независимыми вычислителями, а затем полученные результаты подвергались сравнению. В ходе утомительных проверок Гершель и Бэббидж обнаружили ряд ошибок, и в какой-то момент Бэббидж, обращаясь к небесам, сказал, что хочет, чтобы подобные вычисления осуществлялись при помощи пара, на что Гершель заметил, что подобное вполне возможно.

Впрочем, если верить более поздней автобиографии Бэббиджа, первые мысли об автоматизации табличных расчётов возникли у него ещё раньше. Припоминая эпизод, произошедший в 1812 или 1813 г., Бэббидж пишет: «*...Я сидел в помещении Аналитического общества, в Кембридже, склонив голову над столом в каком-то мечтательном настроении, с лежащей передо мной таблицей логарифмов. Другой член общества вошёл в комнату и, увидев меня в полудрёме, спросил: „Что, Бэббидж, о чём мечтаешь?“ На что я ответил: „Я думаю, что все эти таблицы (тут я указал на логарифмы) могут быть рассчитаны машинами“*»[168].

Уникальная роль Бэббиджа в обработке информации в XIX в. связана с тем, что он одновременно был математиком и экономистом: как математик он видел потребность в надёжных таблицах и знал принципы их создания, но именно как экономист он оценил значимость организационных технологий де Прони и был способен развить их. Де Прони разработал свой

метод на основе принципов производства в то время, когда фабричная организация базировалась на ручном труде с применением чрезвычайно простых инструментов, но за последующие тридцать лет производство сделало огромный шаг вперёд. На смену рабочим фабрик по производству булавок, подобных фабрике, описанной Адамом Смитом, в определённый момент пришли машины. Машину для производства булавок изобрёл Джон Айленд Хоув в 1832 г., а спустя семь лет его фабрика в Коннектикуте уже производила 72 000 булавок в сутки[169]. Бэббидж решил, что, вместо того чтобы воспроизводить трудоёмкие и дорогостоящие процессы де Прони, он применит новейшие производственные технологии и создаст машину для изготовления таблиц. Бэббидж назвал её «разностной машиной» (Difference engine), поскольку в её основу должен был лечь всё тот же «метод разностей», использовавшийся де Прони[170].

2.4.2

Доработка таблиц «Морского альманаха». Первая модель разностной машины

Бэббидж знал, что большая часть ошибок в таблицах связана не с расчётами, а с типографскими огрехами, поэтому проект машины изначально предполагал наличие печатного устройства. Примерно в 1820 или в 1821 г. Бэббидж начал работу над машиной, разработав несколько конструкций вычислительных механизмов, способных приводить в движение наборы печатающих колёс. Он сделал небольшую модель, состоящую из 96 колёс и 24 осей, а затем уменьшил число колёс до 18, а осей — до 3. Машина была готова к исходу весны 1822 г., а в июне — продемонстрирована членам Астрономического общества[171].

Рабочая модель включала в себя расчётный механизм, позволяющий работать с разностями второго порядка, однако механизм печати отсутствовал. В ходе демонстрации модель успешно вычислила тридцать значений выражения $x^2 + x + 41$ — это был излюбленный пример Бэббиджа, поскольку он содержал много простых чисел. Машина выдавала правильные результаты со скоростью 33 цифры в минуту, поэтому демонстрационный расчёт занял в общей сложности две с половиной минуты[172].

2.4.3 Развитие и проблемы проекта разностной машины

Учёный применил незаурядный талант публициста для продвижения проекта разностной машины. Он начал свою кампанию с того, что в 1822 г. написал открытое письмо президенту Королевского общества сэру Хамфри Дэви, предлагая выделить для строительства машины государственное финансирование. Бэббидж утверждал, что точные навигационные таблицы имеют особую важность для морской и индустриальной державы, а его разностная машина обойдётся намного дешевле, чем почти сто контролёров и людей-счётчиков проекта де Прони. Учёный за свой счёт организовал публикацию письма в прессе и позаботился о том, чтобы оно попало в руки влиятельных людей.

В результате в 1823 г. он получил государственное финансирование в размере 1500 фунтов стерлингов на постройку разностной машины, с возможностью увеличения в случае необходимости. Бэббидж сумел убедить большую часть научного сообщества поддержать его проект. Как утверждали сторонники Бэббиджа, идеальная точность разностной машины позволит полностью избавиться от ошибок. Изобретатель также намекал на то, что ошибки в «Морском альманахе» могут привести к затруднениям или даже к опасностям в мореплавании. Его друг Гершель ещё немного сгустил краски и писал: *«Незаметная ошибка в логарифмической таблице похожа на скрытую подводную скалу в море; кто знает, какие крушения она может вызвать?»* Постепенно опасность наличия ошибок в таблицах превратилась в страшные рассказы о том, что навигационные таблицы полны ошибок, которые постоянно приводят к кораблекрушениям. Историкам не удалось найти подтверждений подобным заявлениям, однако необходимость создания более точных таблиц была очевидна.

К сожалению, инженерная сторона дела была куда сложнее, чем разработка концепции: Бэббидж серьёзно недооценил объёмы финансовых и технических ресурсов, необходимых для создания машины. Он работал на переднем крае производственных технологий, и хотя относительно простые машины, такие как паровые двигатели и мощные ткацкие станки, уже широко использовались, но сложные устройства, вроде машин по производству булавок, были редкими новинками. Позже, в 1850-е гг., создать машину Бэббиджу было бы, вероятно, сильно проще, так как в то время уже была создана необходимая инфраструктура машиностроения. И хотя нельзя сказать, что разработка разностной машины в 1820-х гг. была вообще невозможной, но Бэббиджу приходилось платить очень высокую цену за то, чтобы создать первую такую; это было похоже на изготовление первых компьютеров в середине 1940-х гг.: очень сложно и чрезвычайно дорого. Ввиду этого Бэббидж был вынужден сражаться на двух фронтах: во-первых, проектируя разностную машину, а во-вторых, разрабатывая технологию для её создания. Хотя разностная машина отличалась концептуальной простотой, её механическое устройство было сложным, и сегодня в Лондонском музее науки можно увидеть доказательства этого в виде сотен чертежей машины Бэббиджа и тысяч страниц его записей. В течение 1820-х гг. Бэббидж объехал множество европейских фабрик в поисках устройств и технологий, которые могли быть использованы для его машины.

Немногие из его находок нашли своё место в разностной машине, зато самому Бэббиджу удалось превратиться в одного из лучших специалистов своего времени в области высокотехнологичного промышленного производства. В 1832 г. он опубликовал одну из самых важных своих работ — книгу под названием «Экономика технологий и производств» (Economy of Machines and Manufactures), которая выдержала четыре издания и была переведена на пять языков. Правительство продолжало финансировать работу Бэббиджа в течение 1820-х и в начале 1830-х гг., выделив в итоге в общей сложности

2.4.3

Развитие и проблемы проекта разностной машины

около 17 500 фунтов стерлингов, при этом Бэббидж утверждал, что потратил почти столько же из собственного кармана. 35 000 фунтов стерлингов 1820–1830-х гг. примерно эквивалентны 4,3 млн современных фунтов стерлингов[173], что составляет около 530 млн рублей на дату, когда я пишу эти строки (сентябрь 2023 г.). Как видно, сумма довольно внушительная, хотя и не идущая ни в какое сравнение с бюджетами современных крупных научно-исследовательских проектов.

В соответствии с чертежами Бэббиджа разностная машина должна была состоять из 25 000 деталей и весить около четырёх тонн. Подрядчиком Бэббиджа, ответственным за изготовление деталей, был инженер Джозеф Клемент. Однако весной 1833 г., после спора с Бэббиджем о компенсации за перемещение мастерской Клемента ближе к дому Бэббиджа, Клемент остановил все работы и уволил рабочих. Таким образом, изготовление машины было прервано, а около 12 000 неиспользованных деталей машины были позже отправлены в переплавку[174].

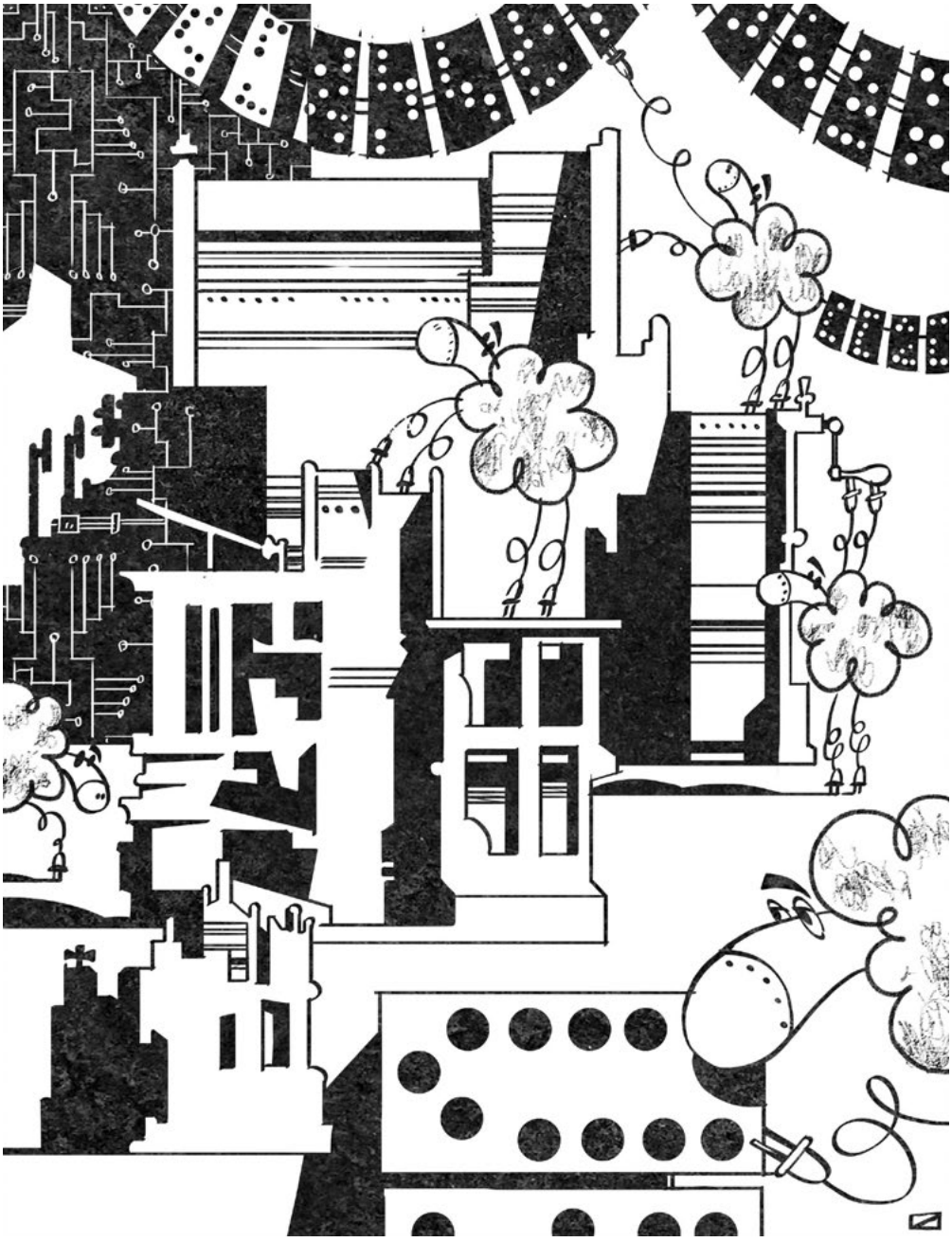
В итоге сохранилась лишь небольшая демонстрационная модель, которую Клемент построил для Бэббиджа в 1832 г. Это чудо техники при размерах 75 × 60 × 60 см (примерно в одну седьмую от полномерной машины) было способно выполнять операции по возведению в степень и находить корни квадратных уравнений[175, 176]. В настоящее время эта модель хранится в Лондонском музее науки, причём находится в функциональном состоянии.

Чтобы создать финальную версию машины, Бэббиджу потребовалось ещё больше денег, о чём он просил в письме премьер-министру Великобритании герцогу Артуру Уэлсли Веллингтону в 1834 г. К сожалению, в это время у Бэббиджа возникла новая идея, настолько потрясающая, что он просто не мог умолчать о ней: машина нового типа, которая могла бы сделать всё, что могла делать разностная машина, но помимо этого могла бы выполнять любые расчёты по заданию человека. Это устройство Бэббидж назвал аналитической машиной (Analytical Engine).

В своём письме герцогу Веллингтону учёный намекнул, что вместо доделки разностной машины ему нужно разрешить построить аналитическую машину. Это стало одной из самых больших ошибок за всю карьеру Бэббиджа: данная идея смертельно подорвала доверие властей к проекту учёного и больше он не получил от правительства ни копейки. Некоторые исследователи считают, что к этому времени Бэббидж был настолько погружен в работу, что полностью потерял из виду первоначальную цель: изготовление таблиц. Машины стали для него самоцелью[177].

Бэббидж был глубоко уязвлён позицией властей. Об этом свидетельствуют строки письма, написанного им в 1835 г. одному из своих американских корреспондентов: *«Вы сможете оценить влияние такой машины на будущий прогресс науки. А я живу в стране, которая не способна это оценить»*[178].

Разозлённый отказом правительства от участия в проекте, Бэббидж переключил внимание на создание аналитической машины, оплачивая из собственных средств работу чертёжников и рабочих. И снова он ведёт работу



над моделью, а затем оставляет её незавершённой, чтобы начать работу над новой. В 1848 г., после нескольких лет трудов по созданию аналитической машины, Бэббидж решает подготовить полный набор чертежей для второй разностной машины, которая должна была включать все улучшения и упрощения, пришедшие Бэббиджу в голову в процессе работы над аналитической

машиной. Он решил вновь представить проект на рассмотрение правительству, но получил отказ от канцлера казначейства. Последнего Бэббидж назвал «Геростратом науки, которого, если он и избежит забвения, запомнят как разрушителя Эфесского храма»[179].

2.4.4 Последователи Бэббиджа: Георг Шутц и другие

Несмотря на неудачи, преследовавшие Бэббиджа, со временем у него обнаружились последователи. В дело вступил Георг Шутц, состоятельный стокгольмский издатель. Впервые Шутц узнал о проекте Бэббиджа в 1832 г., когда начал работу над переводом глав из «Экономики технологий и производств» для своего журнала о производстве и домашнем хозяйстве (Journal för Manufakturer och Hushållning). Немного позже он натолкнулся на статью ирландского популяризатора науки Дионисия Ларднера, опубликованную в июле 1834 г. в «Эдинбургском обозрении» (Edinburgh Review) под названием «Разностная машина Бэббиджа». В ней Ларднер проанализировал семь различных публикаций о машине Бэббиджа, начиная с ранних текстов Бэббиджа и заканчивая отчётом Королевского общества от 1829 г., и в популярной форме изложил принципы её работы[180]. Вдохновлённый этой статьёй, Шутц принял решение о самостоятельной постройке машины. Он изучил все имевшиеся в публичном доступе материалы о машине Бэббиджа, но, поскольку они не содержали детального описания её устройства, Шутцу пришлось во многом повторить работу своего предшественника. Конструкция, предложенная Шутцем, была проще устройства, разработанного Бэббиджем: в ней отсутствовали сложные механизмы для предотвращения ошибок, а некоторые части устройства Шутц решил изготовить из дерева[181], прямо как сердечник трансформатора из байки о студенческой дипломной работе, которую «всё равно никто не прочитает» *.

В 1840 г. Шутц и его сын Эдвард завершили работу над вычисляющей частью машины, которая была способна рассчитывать последовательности пятизначных чисел и разностей первого порядка. В 1842 г. добавились разности второго и третьего порядка, а после добавления печатающей части в 1843 г. машина была завершена.

Шутц неоднократно обращался за финансовой поддержкой к правительству. 3 октября 1837 г. в письме в Королевскую академию наук Швеции он запросил финансирование в размере 20 000 риксдалеров (приблизительно 1650 фунтов по курсу того времени), уверяя, что благодаря более

* Некий студент написал в дипломной работе фразу: «По причине того, что досюда никто не дочитает, сердечник трансформатора рекомендуется сделать из дерева» (вариантов этой байки существует множество: «...выпиливаем турбину из цельного куска дерева, всё равно читать никто не будет» и т. п.).

совершенному дизайну машина может быть построена за один, максимум два года. Академия ответила отказом, сославшись на то, что запрошенная сумма слишком велика для такой страны, как Швеция, с её ограниченными ресурсами. В 1837 г. Георг безрезультатно пытался предложить свою машину Франции. В 1844 г. Шутц снова обращается к шведской короне, запрашивая теперь 10 000 риксдалеров для постройки полноразмерной машины, и снова получает отказ. В 1851 г. он вновь просит финансовой поддержки, на этот раз 3333 риксдалера, и снова отказ со ссылкой на скудность фондов. Впрочем, в том же году Шутцу наконец-то улыбнулась удача — при поддержке Шведской академии наук и радикального политика Андерса Магнуса Бринка (который предложил представителям всех трёх сословий скинуться, чтобы собрать 3333 риксдалера, которых, к несчастью, не хватало королю Оскару) ему удаётся убедить парламент (Riksens ständer) выделить в итоге 5000 риксдалеров, впрочем с условием, что если проект не будет завершён к концу 1853 г., то эти средства необходимо будет вернуть[182].

Георг и Эдвард Шутцы немедленно начали постройку улучшенной версии машины, способной вычислять 15-значные числа и использовать разности четвёртого порядка. Работа велась в стокгольмской мастерской Йохана Вильгельма Бергстрёма и была завершена в октябре 1853 г., без нарушения срока. Шведская Академия наук признала машину удовлетворительной. Был доволен и король, который посчитал проект завершённым и распорядился выделить Шутцу ещё 3333 риксдалера в качестве награды за его отличную работу[183, 184].

В 1854 г. машину привезли в Англию для демонстрации на выставке. К некоторому удивлению Шутца, Бэббидж приложил все усилия для того, чтобы помочь своему шведскому коллеге, и в своём выступлении перед Королевским обществом рекомендовал присудить Шутцу и его сыну медаль Общества. Сын Бэббиджа Генри использовал машину Шутца, чтобы продемонстрировать систему «механической нотации», созданную его отцом. Шведская машина выиграла Золотую медаль в Париже в 1855 г. на Всемирной выставке трудов промышленности, сельского хозяйства и изящных искусств (Exposition Universelle des produits de l'Agriculture, de l'Industrie et des Beaux-Arts). Бэббидж и его сын подготовили серию сопроводительных рисунков для машины, объясняющих принципы её действия[185].

В 1856 г. машину Шутца купил за 5000 долларов американский бизнесмен для Обсерватории Дадли в Олбани (штат Нью-Йорк). Эта машина могла рассчитывать четыре уровня разностей и работать с восьмизначными числами. Сотрудник и будущий второй директор обсерватории Джордж Хаф сам был изобретателем (он сильно усовершенствовал используемый в обсерватории пишущий хронограф и другие приборы) и по достоинству оценил машину. Хаф осуществил в ней большие переделки, чтобы машина могла полноценно использоваться в астрономических целях. Машина в течение многих лет вычисляла эфемериды (таблицы небесных координат астрономических объектов, вычисленных через равные промежутки времени) и различные

поправочные таблицы астрономических наблюдений. В обсерватории сохранилось несколько таких таблиц в распечатанном виде — возможно, первых в мире машинных распечаток для научных расчётов. Потом машина оказалась в Смитсоновском институте, а сегодня хранится в частной коллекции в Чикаго.

В 1857 г. правительство Великобритании заказывает у Шутца новую машину, выделив на её постройку 1200 фунтов. Работы по созданию машины велись в этот раз усилиями фирмы Брайана Донкина, известного английского инженера и промышленника, и завершились в июле 1859 г., через несколько недель после дедлайна и с превышением бюджета на 615 фунтов. В 1863 г. эту машину использовал статистик Уильям Фарр — для расчётов, вошедших в опубликованную в следующем году книгу «Таблицы продолжительности жизни, аннуитетов и премий» (Tables of Lifetimes, Annuities and Premiums) и предназначенных для страхового бизнеса[186]. Сейчас данная машина хранится в лондонском Музее науки.

Вслед за Шутцем в дело вступают и другие последователи Бэббиджа. Мартин Вайберг создаёт свой аналог машины Шутца в 1859 г. (машина использовалась для создания таблиц процентов, а затем — логарифмических таблиц). Альфред Дикон создаёт свою машину в 1862-м, американец Джордж Барнард Грант — в 1874-м.

Идеи Бэббиджа и их реализация 2.4.5

Споры о том, была ли разностная машина, построенная по чертежам Бэббиджа, полностью работоспособной, не стихали до начала 1990-х гг. В период с 1989 по 1991 г., к 200-летию со дня рождения Чарльза Бэббиджа, по сохранившимся чертежам и с небольшими модификациями была собрана работающая копия счётной части Разностной машины № 2. Работы по созданию механизма велись под руководством Дорона Суэйда, а в команду инженеров входили Рег Крик, Питер Тёрви, а также уже известные нам по реконструкции Антикитерского механизма Майкл Райт и Алан Бромли[187]. Остаётся открытым вопрос о том, были ли обнаруженные в чертежах Бэббиджа мелкие недоработки упущениями автора или же являлись своеобразным способом защиты от «нелицензионного копирования»[188].

Отдельного разговора заслуживает проект аналитической машины Бэббиджа, опередивший технологическую мысль своего времени едва ли не на столетие.

В 1834 г. Бэббидж придумал очередное улучшение конструкции разностной машины. В предыдущей версии, когда для вычислений была необходима новая величина — очередное значение последней разности, то её ввод осуществлялся вручную. Бэббидж нашёл способ механического копирования разностей, предложив круговую конструкцию разностной машины,

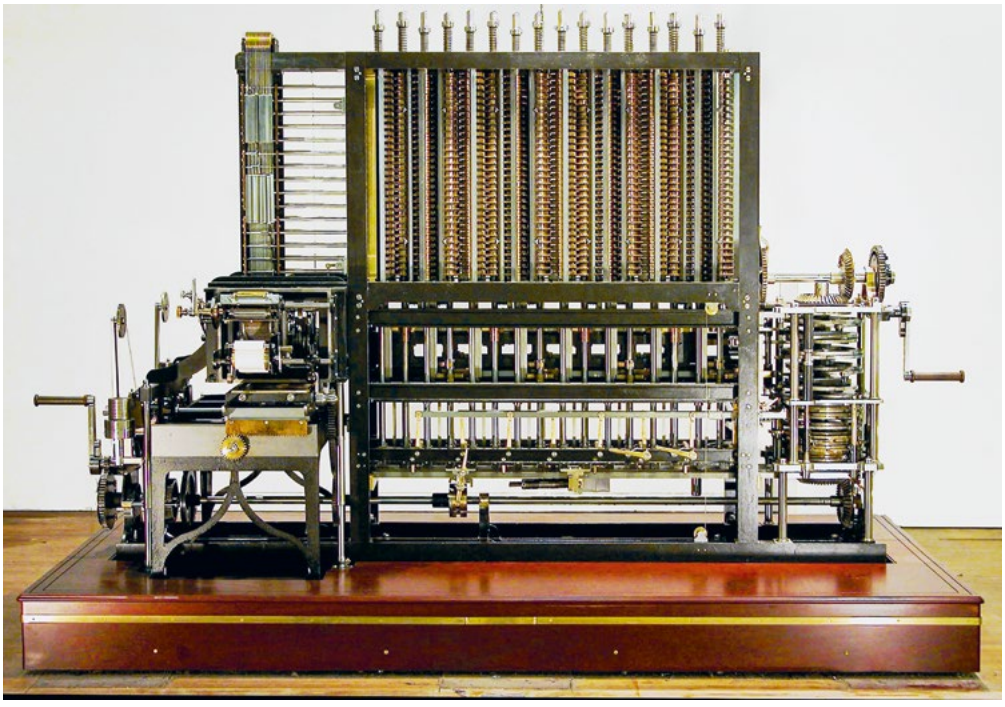


Рис. 21. Разностная машина Чарльза Бэббиджа (функциональная копия счётной части). *Права на изображение принадлежат Дорону Суэйду (Doron D. Swade)*

в которой регистры «последней разности» и «таблицы» располагались рядом, а последний управлял ходом вычислительного процесса. Описывая это действие, Бэббидж говорил, что машина поедает свой собственный хвост или что она подобна локомотиву, который сам укладывает для себя рельсы. Развитие этой идеи привело к мысли о том, что можно управлять машиной совершенно независимыми средствами и заставить её выполнять не только сложение, но и любые арифметические операции в любом порядке и столько раз, сколько может потребоваться.

Таким образом, работа над первой разностной машиной, фактически прерванная весной 1833 г., получила продолжение в проекте аналитической машины, первый чертёж которой датирован сентябрём 1834 г.[189]

С точки зрения архитектуры аналитическая машина была похожа на большинство современных компьютеров. Центральным её элементом было вычислительное устройство — в современных компьютерах оно называется центральным процессором, а Бэббидж использовал термин *mill* (этим словом обозначают фабрику, мельницу, дробилку — словом, нечто, что занимается переработкой). Также машина обладала системой ввода, с 1836 г. для этой цели использовались перфокарты. В качестве устройства вывода аналитическая машина могла, подобно разностной машине, использовать печатающее

устройство или же перфокарты. Также Бэббидж рассматривал возможность создания специального устройства для построения кривых, позволяющего облекать числовой вывод в графическую форму[190].

Память аналитической машины должна была состоять из наборов колёс, размещённых на рядах осей. Планировалось, что она будет способна хранить до 1000 чисел, состоящих из 40 десятичных знаков[191].

Идею использования перфокарт Бэббидж позаимствовал из устройства ткацкого станка, созданного французским изобретателем Жозефом Мари Жаккаром в начале 1800-х гг.

История перфокарт 2.4.6

Вопреки распространённым заблуждениям, Жаккар не был ни изобретателем первого автоматического ткацкого станка, ни изобретателем перфокарт. Более того, он никогда не носил фамилию Жаккар. На самом деле создателя «машины Жаккарда» звали Жозеф Мари Шарль, Жаккар — это прозвище его семьи (Жаккар — производная от имени Жак), унаследованное изобретателем. Хотя Жозеф Мари Шарль действительно стал обладателем первого патента на ткацкий станок, управляемый перфокартами, его главная заслуга заключалась в том, что он доработал конструкцию своего предшественника Жака Вокансона.

История автоматического ткацкого станка началась значительно раньше. В 1725 г. ткач из Лиона по имени Базиль Бушон создал первый полуавтоматический ткацкий станок. Отец Бушона был создателем механических органов или, проще говоря, шарманок, и его работа стала источником вдохновения для сына. Сама идея автоматического воспроизведения музыки чрезвычайно стара. В упоминавшейся ранее «Книге удивительных устройств» Ахмада, Мухаммада и аль-Хасана ибн Муса ибн Шакиров содержится описание водного орга́на, использующего сменные цилиндры с записями музыкальных произведений. Вероятно, сам принцип использования барабана со штифтами для программирования действий устройства восходит к автомату Герона Александрийского — устройству, движением которого управляла разматывающаяся под воздействием груза верёвка (за счёт штифтов менялось направление разматывания)[192]. С начала XIII в. в Нидерландах встречаются первые упоминания о механических карильонах — музыкальных инструментах, обычно устанавливаемых на колокольнях или муниципальных зданиях. Карильон представляет собой набор колоколов, которые могут приводиться в движение при помощи механической клавиатуры или автоматически при помощи барабана со штифтами[193]. Этот же принцип автоматического управления унаследовали шарманки и музыкальные шкатулки[194].

При изготовлении барабана шарманки создатель музыкальной партитуры передаёт плотнику лист бумаги, содержащий разметку, указывающую расположение штифтов. Вдохновлённый этим методом, Бушон приспособил

рулон перфорированной бумаги к ткацкому станку для того, чтобы выбирать нити основы, которые должны быть подняты крючками. Эта конструкция

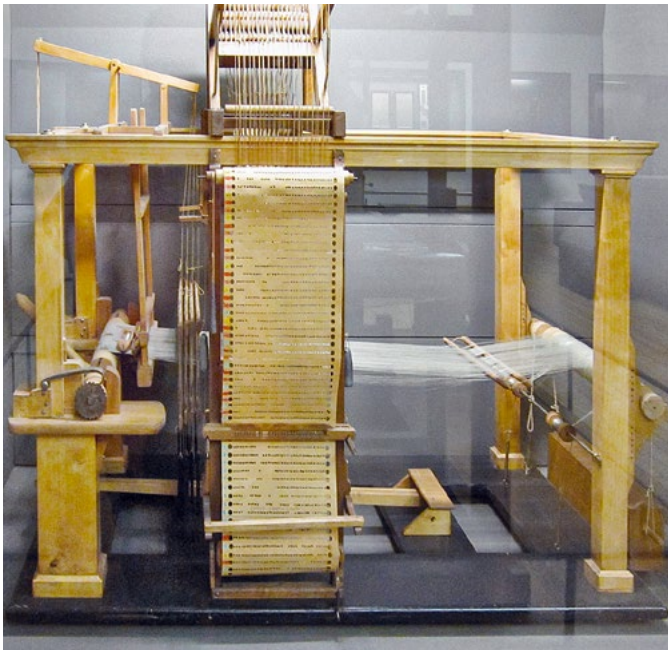


Рис. 22. Полуавтоматический ткацкий станок Бушона

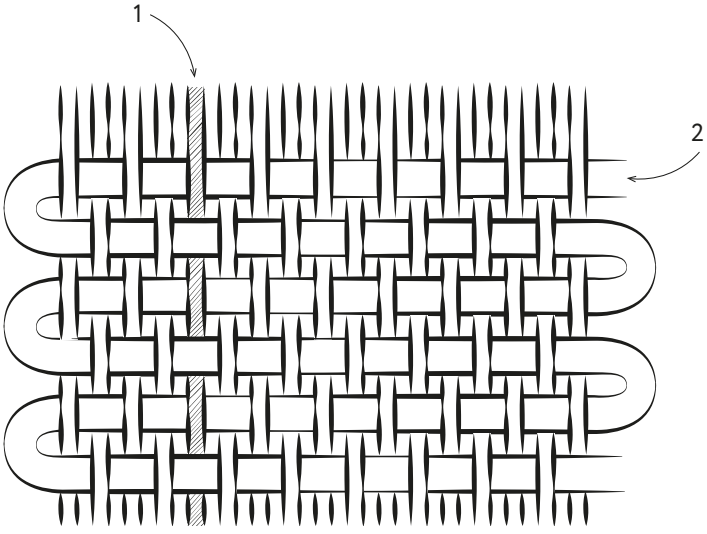


Рис. 23. Структура ткани: 1 — основа (продольные нити ткани), 2 — уток (поперечные нити ткани, переплетающиеся с продольными)

2.4.6

История перфокарт

оказалась в целом работоспособной, однако требовала вмешательства человека для подачи бумаги. Кроме того, сама бумага часто рвалась[195].

Три года спустя помощник Бушона Жан-Батист Фалькон доработал конструкцию станка, заменив рулон бумаги на картонные карты, прикреплённые друг к другу петлями. Однако перемещение карт всё ещё осуществлялось вручную. Станки Бушона и Фалькона пользовались ограниченным успехом, к 1762 г. им удалось реализовать около 40 машин[196].

В период с 1745 по 1750 г. Жак Вокансон (Jacques Vaucanson), искусный механик, занимавший пост главного инспектора французских шёлковых мануфактур, смог внести дальнейшие усовершенствования в конструкцию станка.

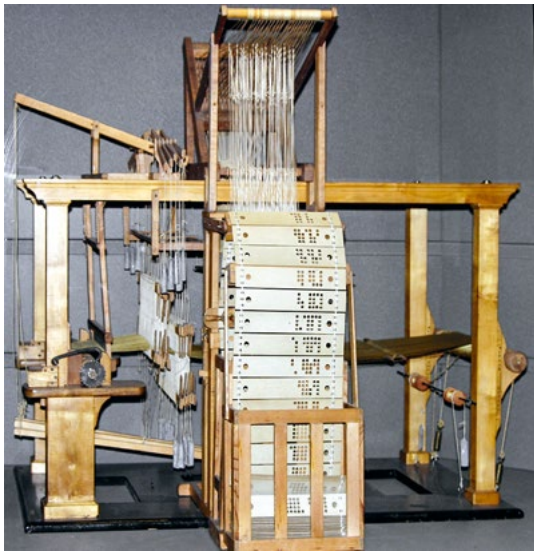


Рис. 24. Ткацкий станок Фалькона

Жака де Вокансона (получившего приставку «де» к фамилии от французской Академии наук) можно по праву назвать одним из отцов робототехники. Будучи десятым сыном в бедной семье перчаточных дел мастера, Вокансон получил образование в школе иезуитов, а затем — монахов-минимов. В 1727 г. он открыл мастерскую в Лионе, в которой занялся конструированием различных механических игрушек. Медные утки Вокансона порхали, били крыльями, клевали рассыпанный корм. Механический флейтист — полноразмерная фигура человека, внутри которой были установлены пружины и мехи, направлявшие воздух в различные части устройства таким образом, что губы и пальцы автомата совершали правильные движения по флейте. В 1738 г. в Париже Вокансон опубликовал работу «Механизм автомата-флейтиста» (Le mécanisme du fluteur automate), в которой разъяснил принципы действия автомата.

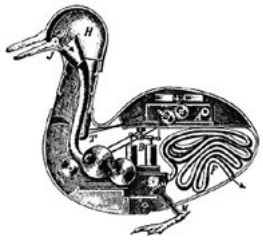


Рис. 25. Механическая утка Вокансона

Вокансон заменил связку карт на ленту перфорированной бумаги, обёрнутую вокруг вращающегося перфорированного металлического цилиндра. Крючки, поднимающие нити основы, выдвигались при помощи длинных игл, массив которых прижимался к цилиндру. Таким образом, иглы, упиравшиеся в участки ленты, на которых в бумаге отсутствовали отверстия, выдвигались вперёд. Каждый из крючков под прямым углом проходил через ушко соответствующей иголки. Разместив свой механизм над

станком, Вокансон избавился от сложной системы грузов и шнуров. Он также добавил храповой механизм для продвижения ленты после очередного прижатия ряда игл к цилиндру. Таким образом, станок стал полностью автоматическим[197]. Однако из-за ограничений длины ленты, оборачиваемой вокруг цилиндра, а также из-за сложности изготовления и высокой стоимости цилиндров станок Вокансона так и не получил широкого распространения. Зато этот проект всерьёз рассердил лионских ткачей, которые забросали изобретателя камнями и организовали протест и забастовки[198]. В конце концов станок Вокансона занял своё место в коллекции «Консерватории искусств и ремёсел» (Conservatoire national des arts et métiers).

Рис. 26. Ткацкий станок Вокансона

На рубеже XVIII–XIX вв. Жаккару было предложено воссоздать ткацкий станок Вокансона — Наполеон Бонапарт, пришедший к власти в 1799 г., хотел модернизировать промышленность Франции[199].

Одним из первых усовершенствований, внесённых Жаккаром в конструкцию Вокансона, стал возврат от бумажной ленты к цепочке перфокарт. Затем он избавился от дорогостоящих металлических цилиндров Вокансона, заменив их более технологичной призмой. Фактически термин «жаккардовый ткацкий станок» не вполне точен: в действительности Жаккар изобрёл машину, которая может быть приспособлена к различным ткацким станкам[200].

Элементы машины Жаккара — это ножи, крючки, иглы, рамная доска, рамные шнуры и перфорированная призма. Нити основы, проходящие через глазки галев (галево — деталь ткацкого станка, предназначенная для

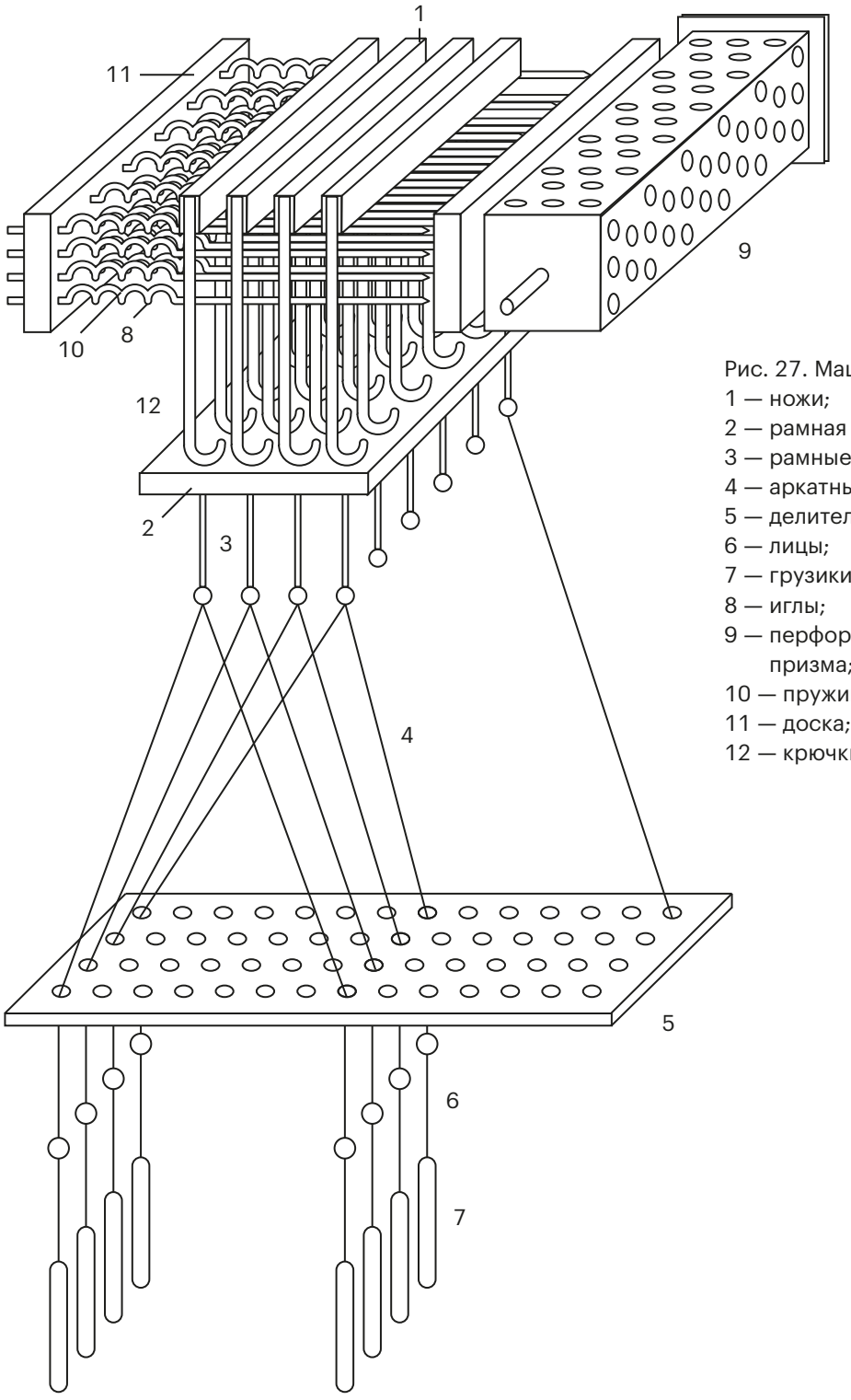


Рис. 27. Машина Жаккара:
1 — ножи;
2 — рамная доска;
3 — рамные шнуры;
4 — аркатные шнуры;
5 — делительная доска;
6 — лицы;
7 — грузики;
8 — иглы;
9 — перфорированная призма;
10 — пружина;
11 — доска;
12 — крючки

подъёма или опускания нити основы; галево может быть изготовлено из нити, пластинки или проволоки, при этом в его центре находится отверстие (глазок), через которое проходит одна из нитей основы), связаны с машиной так называемыми аркатными шнурами, продетыми в делительную доску для равномерного распределения по ширине станка. Ножи, установленные в ножевой раме, осуществляют возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости. Крючки, находящиеся в зоне действия ножей, захватываются ими и поднимаются вверх, а через рамные и аркатные шнуры поднимаются вверх и нити основы, образуя верхнюю часть так называемого зева (вертикального промежутка между поднятыми и опущенными нитями основы). Крючки, выведенные из зоны действия ножей, опускаются вниз вместе с рамной доской. Опускание крючков и нитей основы происходит при помощи грузиков. Опущенные нити основы образуют нижнюю часть зева. Из зоны действия ножей крючки выводятся иглами, на которые действует призма с размещёнными на её поверхности перфокартами, осуществляющая качательные и вращательные движения[201].

В 1801 г. после успешной демонстрации своей машины в Париже (после неё французское правительство наградило Жаккара бронзовой медалью) Жаккар выставил её в Лионе. Ткачи, понимая, что их хлеб и масло находятся под угрозой, толпой напали на изобретателя и разрушили его изобретение. Трижды Жаккару угрожали убийством. Сам он так описывает это событие: *«Железо [металлические остатки машины] было продано как металлолом, дерево [деревянные части] — на дрова, а я был приговорён ко всеобщему позору»*.

В апреле 1805 г. император Наполеон и императрица Жозефина посетили Лион и во время поездки ознакомились с изобретением Жаккара. Патент Жаккара передали городу Лиону, взамен изобретатель получил ежегодную пожизненную пенсию в 3000 франков (по покупательной способности эта сумма примерно равна 1,5 млн рублей в 2023 г.[202]) и ежегодные отчисления в размере 50 франков за каждый ткацкий станок в течение первых шести лет его эксплуатации. Началось активное производство, и в 1812 г. во Франции уже использовалось 11 000 жаккардовых ткацких станков. При этом, несмотря на энергичные усилия Франции по сохранению технологии в секрете, станки начали появляться и в других странах[203]. Таким образом, во времена Бэббиджа технология использования перфокарт уже находилась на стадии широкомасштабного промышленного применения.

Современники Бэббиджа — Ада Лавлейс и Луиджи Менабреа 2.4.7

Рис. 28. Перфокарта для ткацкого станка Жаккара

Несмотря на то что правительство Великобритании сочло идею создания аналитической машины недостойной финансирования, среди современников Бэббиджа нашлись люди, оценившие замысел учёного по достоинству. В сентябре 1840 г. Чарльз Бэббидж прибыл в Турин для участия во Втором конгрессе итальянских учёных. В ходе публичного выступления он рассказал о принципах устройства аналитической машины[204]. Информация об этом визите (помимо воспоминаний самого Бэббиджа) происходит из необычного источника — сообщения секретной полиции о Фортунато Пранди, итальянце, который сопровождал Бэббиджа из Лондона в Турин в качестве переводчика и в котором полицейские подозревали революционного пропагандиста. Благодаря детальным отчётам шпиков мы сегодня можем в деталях восстановить все события итальянской поездки Бэббиджа[205].

В Туринской академии наук (Accademia della Scienze di Torino), куда Бэббиджа пригласил профессор Джованни Плана, сохранились документы, которые Бэббидж привёз с собой в Турин для того, чтобы передать в подарок Плане и его коллегам. Эти документы включают в себя диаграммы, чертежи, лекционные заметки, множество листов с вычислениями, вырезанных аккуратно, по всей видимости, из записных книжек Бэббиджа, а также набор перфокарт, представляющий, судя по всему, первую дошедшую до наших дней компьютерную программу[206].

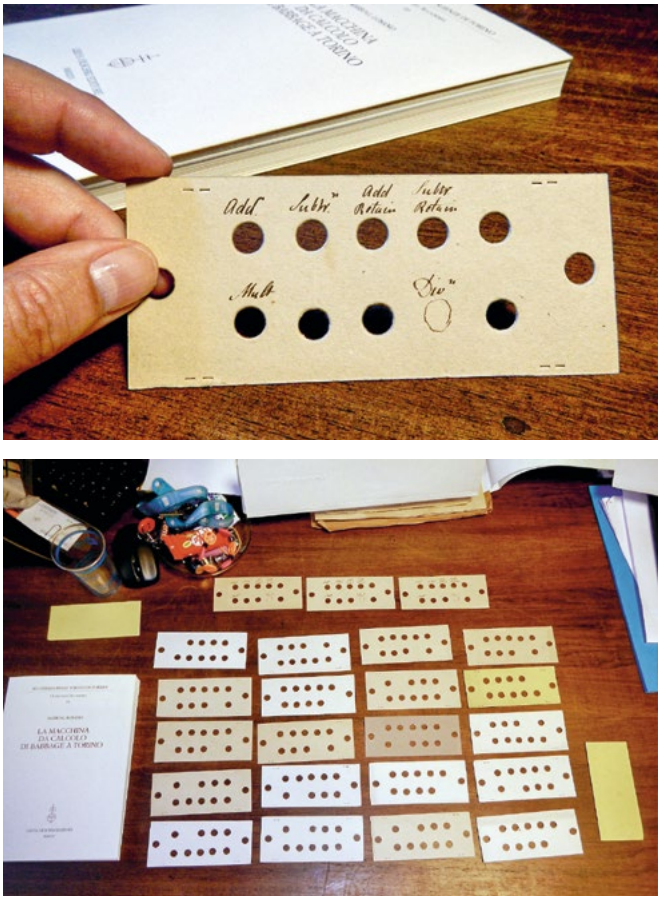


Рис. 29. Перфокарты Бэббиджа

Во время своего визита Бэббидж не ограничился одной только лекцией, он провёл несколько дней с элитой научно-технического сообщества Турина. В воспоминаниях Бэббидж пишет: *«М[истер] Плана планировал изначально делать заметки, чтобы затем выполнить описание принципов устройства машины. Но его собственные трудоёмкие занятия заставили его отказаться от этого плана и передать задачу своему младшему товарищу, м[истеру] Менабреа, который уже зарекомендовал себя в качестве глубокого аналитика»*[207].

2.4.7

Современники Бэббиджа — Ада Лавлейс и Луиджи Менабреа

Луиджи Федерико Менабреа — талантливый инженер и математик, в 26 лет получивший должность профессора механики и строительства в Военной академии, позже он станет влиятельным политиком и займёт пост премьер-министра Италии (1867–1869). Однако вписать своё имя в историю мировой науки ему удастся гораздо раньше: в 1842 г. в 82-м номере журнала *Bibliothèque Universelle de Genève* выходит на французском языке его статья «Заметки об аналитической машине Чарльза Бэббиджа» (Notions sur la machine analytique de M. Charles Babbage)[208]. Английский перевод этой статьи появляется годом позже — в третьем номере журнала *Scientific Memoirs* — с замечаниями и дополнениями переводчика, миссис Августы Ады Кинг, графини Лавлейс[209].

Августа Ада (обычно называемая по своему второму имени — Ада, которое она получила в честь сестры отца) была единственной законной дочерью поэта-романтика лорда Джорджа Гордона Байрона. Она родилась в 1815 г. и воспитывалась матерью — Анной Изабеллой Милбенк, дочерью богатого баронета, внучкой лорда Уэнтворта, которая развелась с мужем в апреле 1816 г. Одним из увлечений Анны была математика, из-за чего Байрон называл её «принцессой параллелограммов» и «математической Медеей». Дочь унаследовала увлечение матери, а также во многом страстную натуру отца, которая, как и в его случае, была источником не только вдохновения, но и серьёзных проблем. Например, увлечение Ады скачками в конце 1840-х гг. стоило ей более 3000 фунтов: в 1851 г. она предприняла попытку создать математическую модель для осуществления крупных ставок, однако потерпела неудачу, приведшую её к многотысячным долгам.

Лавлейс впервые встретилась с Чарльзом Бэббиджем в июне 1833 г. благодаря их общей знакомой — Мэри Сомервилль, популяризатору науки и специалистке в области математики и астрономии. Интересно, что слово «учёный» (scientist) возникло в английском языке именно благодаря Мэри Сомервилль. В 1834 г. Уильям Уэвелл, делавший обзор её книги «Взаимосвязь физических наук» (On the Connection of the Physical Sciences), впервые употребил этот термин, так как в данном контексте *man of science* звучало бы нелепо. Когда философ и экономист Джон Стюарт Милль организовал массовую петицию за предоставление женщинам избирательных прав, адресованную парламенту Великобритании, именно подпись Сомервилль следовала первой в перечне подписантов.

В конце июня Бэббидж пригласил Аду взглянуть на прототип своей разностной машины. Мисс Байрон была очарована машиной и использовала дружбу с Сомервилль, чтобы посещать Бэббиджа настолько часто, насколько могла. Интеллект и аналитические способности девушки произвели большое впечатление на учёного. Он называл её «чародейкою числа» (Enchantress of Number). В 1843 г. Бэббидж писал ей: *«Забудьте об этом мире и всех его проблемах, и, если возможно, его многочисленных шарлатанах — оставайтесь только чародейкою числа»*[210, 211].

В своих воспоминаниях жена шотландского математика и логика Огастеса де Моргана писательница и общественный активист София Элизабет де

Морган так описывает один из первых визитов Ады к Бэббиджу: *«В то время как другие посетители смотрели на работу этого прекрасного инструмента с таким выражением <...> которое, говорят, демонстрируют дикари, впервые увидев зеркало или услышав звук ружейного выстрела <...> юная мисс Байрон поняла, как работает это изобретение, и увидела его великую красоту»*[212, 213].

В 1835 г. Ада Байрон вышла замуж за лорда Уильяма Кинга. Мать Ады была потомком пресекшегося по мужской линии рода баронетов Лавлейс, и в 1838 г. лорд Уильям Кинг становится первым графом Лавлейс и виконтом Окхэм, а сама Ада соответственно превращается из леди Кинг в графиню Лавлейс. У Ады и её мужа было трое детей: Байрон, Анна Изабелла (в будущем известная путешественница леди Энн Блант) и Ральф Гордон. По удачному стечению обстоятельств Ада принадлежала к привилегированным слоям общества, поэтому ни замужество, ни рождение детей не помешало её занятию наукой. Первым воспитателем детей Ады стал Уильям Бенджамин Карпентер — медик, зоолог и физиолог, сыгравший впоследствии немалую роль в становлении Лондонского университета.

К выполненному переводу 25-страничной статьи Менабреа Ада добавляет 41 страницу собственных примечаний, которые включают «диаграмму вычислений машиной чисел Бернулли», из-за чего Аду часто называют автором первой в мире компьютерной программы. Это, конечно, не совсем точно, так как автором первых программ для аналитической машины был, безусловно, сам Бэббидж: в промежуток между 1837 и 1840 г. он написал их несколько десятков[214]. Однако программа Ады была первой опубликованной, так что я думаю, что мы вполне можем признать графиню Лавлейс предтечей движения за открытое программное обеспечение (open source).

В заметках к статье Менабреа Лавлейс подчёркивает разницу между аналитической машиной и предыдущими вычислительными машинами, особенно возможность запрограммировать её для решения задач любой сложности. Она поняла, что потенциал устройства простирается далеко за пределы простого перемалывания чисел: *«[Аналитическая машина] могла бы применяться помимо чисел и к другим вещам. Существуют объекты, чьи взаимные фундаментальные отношения могут быть выражены при помощи абстрактной науки об операциях и которые могут быть приспособлены к действию операционной нотации и механизма машины... Предположим, например, что знания о фундаментальных отношениях звуков определённого тона в музыкальной композиции удастся подвергнуть такому описанию и адаптации, в таком случае машина могла бы сочинять тщательно проработанные и научно обоснованные музыкальные произведения любой степени сложности и любого объёма»*[215].

Перу Ады принадлежит и более поэтическое высказывание на этот счёт: *«Аналитическая машина ткёт алгебраические узоры, подобно тому как станок Жаккара ткёт цветы и листья»*[216].

Помимо работы с Бэббиджем, Лавлейс интересуют и другие сферы деятельности и направления в науке. В 1844 г. она сообщила своему другу Воронцову

2.4.7

Современники Бэббиджа — Ада Лавлейс и Луиджи Менабреа

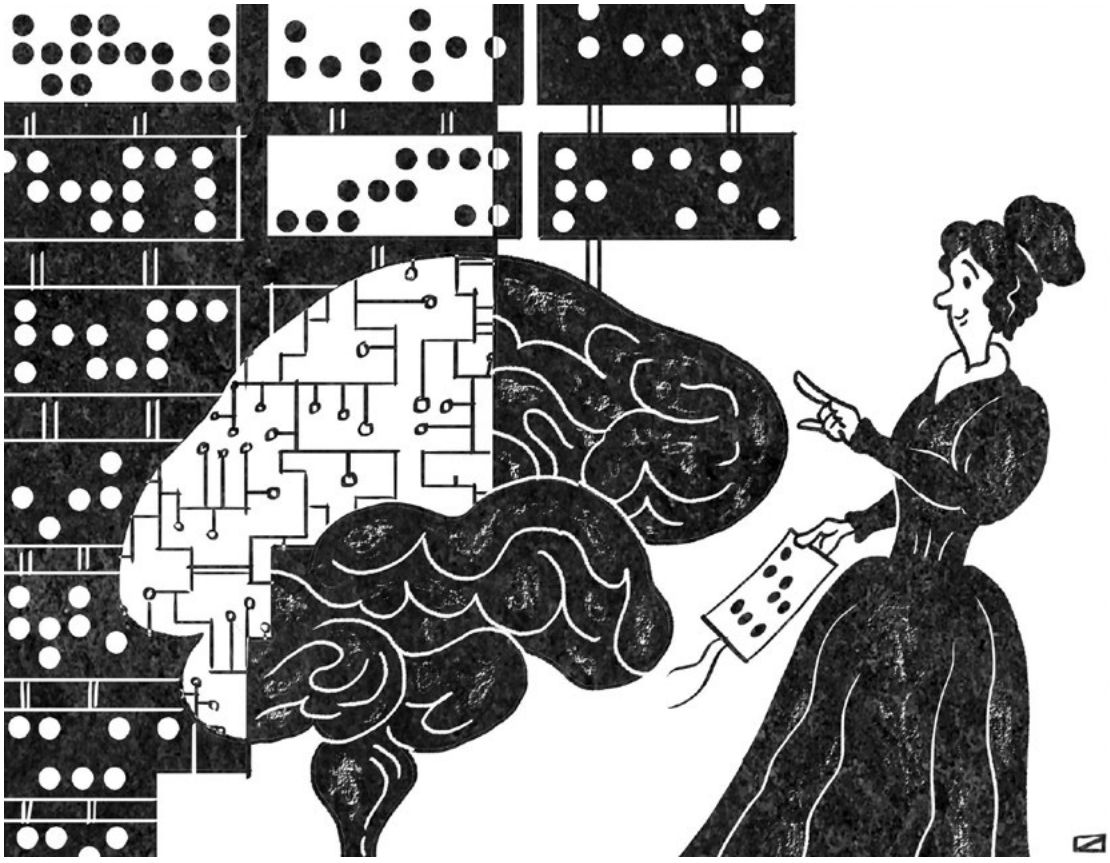
Грейгу о желании создать математическую модель того, как мозг вызывает мысли и чувства (не удивляйтесь: в данном случае Воронцов — это имя, а Грейг — фамилия. Первым мужем Мэри Сомервилль был русский консул в Лондоне капитан Самуил Грейг, в их браке родились двое сыновей, один из которых, Воронцов Грейг, стал впоследствии адвокатом и учёным).

Вот небольшие выдержки из письма Лавлейс: *«…У меня есть определённые надежды, что я однажды смогу выразить мозговые явления в виде математических уравнений, кратко говоря — в виде закона или законов взаимных действий молекул мозга (эквивалента закона всемирного тяготения для планет и звёзд).*

<…>

Я не думаю, что вопросы деятельности мозга при правильном рассмотрении должны быть в меньшей степени подвластны математикам, чем вопросы движений звёзд и планет. Я надеюсь завещать будущим поколениям исчисление нервной системы»[217].

К сожалению, мечтам Ады не суждено было сбыться. В возрасте 37 лет она умирает от рака матки[218].



2.4.8 Последние годы Бэббиджа и дальнейшая жизнь его идей

Отчаявшись получить финансирование на строительство аналитической машины, Бэббидж посвятил остаток жизни другим научным проектам. В частности, он занимался вопросами метрологии и затеял проект, целью которого был расчёт значений физических констант. Также Бэббидж занимался железнодорожным транспортом. Наверняка, рассматривая изображения паровозов, вы обращали внимание на приспособление в форме треугольного гребня, смонтированное на передней части локомотива. Оно называется путеочистителем или метельником, а раньше носило смешное название «скотоотбрасыватель» (варианты: «скотосбрасыватель», «скотоотбойник»). Устройство это изобрёл Чарльз Бэббидж. В 1838 г. Бэббидж предпринял ряд исследований для того, чтобы доказать превосходство железнодорожной колеи шириной 1435 мм (сегодня она называется европейской колеёй; примерно 60% железных дорог в мире построены сегодня именно по этому стандарту), предложенной другом учёного, инженером Изамбардом Кингдомом Брюнелем, для чего Бэббидж соорудил специальный вагон для измерения вибраций, возникающих при движении поезда на различных скоростях.

Изамбард Кингдом Брюнель — одна из весьма интересных фигур в истории промышленной революции. Его отцом был Марк Изамбард Брюнель — английский инженер французского происхождения, вице-президент Королевского лондонского общества наук, изобретатель проходческого щита и строитель первого туннеля под Темзой. В 1833 г. младшего Брюнеля назначили главным инженером Большой западной железной дороги, где он занимался постройкой мостов, туннелей и других инженерных сооружений. Он же руководил сооружением Хангерфордского висячего моста в Лондоне, участвовал в постройке мостов Conway и «Британия»; позже построил доки в Кардиффе и Сандерленде и паровые суда Great Western (1835), Great Britain (1842) и Great Eastern (1859). Во время Крымской войны ему поручили постройку военного госпиталя, который затем был возведён в Ренкиое (Эренкое) у Дарданелл. Отличительной особенностью этого проекта стало то, что в его основу легли строения, возводимые из произведённых заранее элементов, фактически это был один из первых примеров использования сборных домов. В русской «Википедии» вы также можете прочитать о том, что Брюнель «предлагал построить канонерскую лодку для высадки боевых машин для атаки крепости Кронштадт», «прообраз танков-амфибий», однако при внимательном знакомстве с первоисточником становится ясно, что речь шла всего лишь о бронированном корабле, вооружённом артиллерийским орудием (The plan of a gun-boat, or, as it would be more correctly called, a floating gun-carriage). Правда, корабль предлагалось оснастить водомётным движителем, а также телескопом для обеспечения обзора из-под брони[219].

2.4.8

Последние годы Бэббиджа и дальнейшая жизнь его идей

С конца 1850-х гг. Бэббидж активно участвует в кампаниях против «общественных неприятностей», собирая статистику по ущербу, причиняемому пьяными дебошами, уличными шарманщиками и детьми, играющими в серсо. *«Трудно оценить нищету, причинённую тысячам людей, и сумму денежных потерь, понесённых множеством интеллектуальных работников из-за растраты своего времени, произошедшей по вине игры шарманщиков и других подобных неприятностей»*, — пишет он. Подобные нравоучительные сентенции выдают глубокое разочарование в жизни, постигшее учёного на склоне лет. Бэббидж отказался от рыцарства и титула баронета, предложенных ему в знак признания заслуг. Он скончался в своём доме на улице Дорсет, Мэрилебон, 18 октября 1871 г. в возрасте 79 лет, причиной смерти стала почечная недостаточность, развившаяся на фоне цистита.

В наши дни порой непросто установить достоверность тех или иных исторических анекдотов, в которых фигурирует Бэббидж, — его фигура ещё в XIX в. обросла множеством легенд и слухов. Например, во многих научно-популярных книгах можно встретить следующую забавную историю.

Каждое мгновение умирает человек,
Каждое мгновение человек рождается.
[Every moment dies a man,
Every moment one is born.]

Этот фрагмент из стихотворной поэмы Альфреда Теннисона заставил Бэббиджа отправить поэту письмо, в котором математик писал: *«Если бы это было правдой, то население мира оставалось бы постоянным. Но на деле уровень рождаемости немного превышает уровень смертности. Поэтому я предлагаю [для следующего издания вашей поэмы]:*

Каждое мгновение умирает человек,
Каждое мгновение $1\frac{1}{16}$ человека рождается…
[Every moment dies a man,
Every moment $1\frac{1}{16}$ is born]

На самом деле фактическое число такое длинное, что не поместится в строку, но я думаю, что $1\frac{1}{16}$ будет достаточно точным для стиха…» [220]

Один из первых письменных источников этой байки — сборник светской болтовни под названием «Наблюдения и заметки» (Observed and noted) за авторством Роберта Риска, увидевший свет в 1893 г. Правда, в варианте Риска Бэббидж предлагает вариант *«Каждое мгновение умирает человек и человек и одна шестнадцатая рождается» [Every moment dies a man / And one and sixteenth is born]* и заканчивает своё письмо несколько иначе: *«Я могу добавить, что точное число составляет 1,167; но тут мы, конечно, вынуждены придерживаться требований стихотворного метра»* [221].

Но ведь $1 + 1/16$ — это не 1,167, а 1,0625. Вряд ли Бэббидж мог перепутать обыкновенную дробь с десятичной. Даже если бы речь шла о 1,16 и 1,167, то математик округлил бы 1,167 до 1,17, а не до 1,16. Словом, даже если Риск и цитирует действительно существовавшее когда-либо письмо Бэббиджа, то делает это неточно. Спустя семь лет после выхода из печати книги Риска ту же байку пересказывает редактор нового издания поэзии Теннисона — Джон Коллинз. Он повторяет ту же математическую ошибку, но снабжает историю новыми подробностями. Якобы Теннисон прислушался к критике Бэббиджа и заменил вариант «каждую минуту» [every minute], присутствовавший во всех изданиях Теннисона вплоть до 1850 г., на «каждое мгновение» [every moment], поскольку слово «мгновение», в отличие от слова «минута», обозначает короткий, но относительно неопределённый промежуток времени[222, 223]. В общем, так или иначе Бэббидж предстаёт в этой истории не то сварливым педантом, не то прекраснодушным чудаком, не то и вовсе викторианским троллем, что вполне может соответствовать ожиданиям читателей, но у настоящих сварливых педантов подобные анекдоты скорее вызывают подозрения: не слишком ли эта история хороша для того, чтобы быть правдой?

Младший из выживших сыновей Бэббиджа, Генри Бэббидж, которому учёный завещал свои записи, мастерскую, все созданные устройства и их элементы, предпринял несколько попыток продолжить работу отца. После смерти отца он создал шесть небольших демонстрационных образцов разностной машины № 1, один из которых отправил в Гарвардский университет[224]. Генри также построил экспериментальный четырёхфункциональный (выполняющий четыре действия арифметики) вычислитель для «мельницы» аналитической машины, завершив его в 1910 г. в возрасте 86 лет[225].

Гарвардский прототип разностной машины Генри Бэббиджа был позднее обнаружен Говардом Эйкеном, руководителем проекта по созданию первого американского программируемого компьютера (Harvard Mark I). Эйкен говорил, что, увидев машину Бэббиджа, *«он почувствовал, что Бэббидж обращается из прошлого лично к нему»*[226]. Однако в целом непосредственное влияние работы Бэббиджа на развитие вычислительной техники в 1930-е гг. оказалось исчезающе малым. Создатель первой программируемой вычислительной машины Конрад Цузе не был знаком с работами Бэббиджа, знания Эйкена о разностной и аналитической машинах во время работы над Harvard Mark I ограничивались сведениями из популярных источников. Машина Эйкена, в отличие от аналитической машины Бэббиджа, не содержала оператора условного ветвления, что делало программный код чрезвычайно громоздким[227].

В октябре 2010 г. Джон Грэм-Камминг, британский программист и писатель, начал краудфандинговый проект «План 28», целью которого является изучение чертежей и других материалов Бэббиджа, а впоследствии создание сперва виртуальной, а затем и исполненной в металле аналитической машины. К 2017 г. была создана база данных по всем сохранившимся материалам Бэббиджа, а также завершён первичный обзор объёмных записных книжек

2.4.8

Последние годы Бэббиджа и дальнейшая жизнь его идей

учёного[228]. Планировалось, что полностью функциональная аналитическая машина будет завершена в 2021 г., к 150-летию со дня смерти Бэббиджа, однако работы по анализу архивов Бэббиджа значительно затянулись, и по состоянию на начало 2023 г. машина всё ещё не построена. Предполагается, что по завершении работ она будет иметь примерно 675 байт памяти и работать с тактовой частотой около 7 Гц[229].

Новейшие достижения в области микроэлектромеханических систем (МЭМС) и нанотехнологий вызвали рост интереса к высокотехнологичным экспериментам в сфере механических вычислений. Представьте себе машину, собранную, грубо говоря, из миллионов наношестерён и нановалов. К предполагаемым преимуществам подобных систем относят их способность осуществлять вычисления в условиях сильной радиации или высоких температур. Журнал *The Economist* в 1999 г. рассказал читателям о подобных перспективах МЭМС в статье под названием «Последний смех Бэббиджа» (Babbage's last laugh)[230].

Чарльз Бэббидж был весьма заметной фигурой в истории развития технологий. Родись он в наше время, не исключено, что его личность вызывала бы столь же ожесточённые пересуды, как и личность Илона Маска. Наверняка нашлись бы люди, которые обвинили бы его в том, что он слишком много внимания уделял пиару и, растратив выделенные государством средства, так и не сумел создать работающую версию машины, способную принести практическую пользу. Он не смог правильно оценить финансовые и временны́е затраты в своём проекте, безрассудно отклонился от первоначального плана и так далее, и так далее, и так далее. Возможно, нашлись бы и такие, которые поставили бы Бэббиджу в вину то, что его безответственное поведение задержало прогресс в области вычислительной техники, поскольку его неудача ухудшила имидж подобных проектов в глазах государственных и частных инвесторов. Когда читаешь выпады прижизненных противников Бэббиджа, на ум невольно приходят параллели с современными пересудами в социальных сетях. Например, Ричард Шипшенкс, английский астроном, в своём «Письме к Совету Посетителей (Board of Visitors) Гринвичской Королевской обсерватории» (1854) пишет: *«Лучший авторитет в этой стране, за исключением, возможно, королевского астронома, покойный доктор Томас Янг считал, что деньги, выделенные на постройку разностной машины, лучше было использовать в качестве фонда для выполнения расчётов. Принимая во внимание тот факт, что мы не получили ничего взамен наших 17 000 фунтов, кроме ворчания г-на Бэббиджа, я думаю, что многие люди согласятся с мнением доктора Томаса Янга, хотя оно и принесло ему посмертную враждебность со стороны г-на Бэббиджа»*[231].

Однако негативный взгляд на итоги деятельности Бэббиджа следует признать поверхностным.

Помимо непосредственного вклада в развитие теории автоматических вычислений (например, именно Бэббидж первым разработал и использовал концепцию циклов и условных переходов[232]), достаточно обратить внимание

на то, что в процессе работы над своими машинами Бэббидж совершил настоящую революцию в металлообработке: он сконструировал поперечно-строгальный и токарно-револьверный станки, изобрёл новые методы производства зубчатых колёс, заточки инструментов и литья под давлением. В числе изобретений Бэббиджа: спидометр, офтальмоскоп, сейсмограф, устройство для наведения артиллерийских орудий. Ему удалось достичь существенного прогресса в теории функционального анализа и криптографии (например, он первым смог взломать шифр Виженера; в этом шифре в качестве ключа используется некоторая последовательность чисел, каждое из которых задаёт сдвиг в алфавите соответствующего символа исходного сообщения, далее ключ повторяется). Как видно из этого списка, одними только побочными продуктами изысканий Бэббиджа можно с лихвой оправдать затраченные средства и усилия. Впрочем, если разобраться в вопросе детально, и непосредственные достижения Бэббиджа в области вычислительной техники были не столь уж бесполезными, как может показаться на первый взгляд.

Табулятор Холлерита 2.5

> Итак, седьмая планета, которую он посетил, была Земля. Земля — планета не простая! На ней насчитывается сто одиннадцать королей (в том числе, разумеется, и негритянских), семь тысяч географов, девятьсот тысяч дельцов, семь с половиной миллионов пьяниц, триста одиннадцать миллионов честолюбцев — итого около двух миллиардов взрослых.
>
> Антуан де Сент-Экзюпери. *Маленький принц*

Эксцентричный философ Александр Бард, известный публике не только своей «Трилогией Футурики» (The Futurica Trilogy) и термином «нетократия», но и благодаря участию в музыкальных коллективах Army of Lovers и Gravitonas, в одной из публичных лекций предложил переизобрести историю. Не в том смысле, конечно, чтобы подвергнуть сомнению исторические факты или их периодизацию, а скорее в том, что объективные данные исторической науки могут рассматриваться с разных точек зрения и точка зрения во многом определяется особенностями эпохи, к которой принадлежат сами историки, а также источниками их доходов. На смену истории, написанной монахами, пришла история эпохи индустриальной революции — и вот уже на смену трактатам, возводящим родословные царей к библейским персонажам, приходят работы, рассуждающие о каменном, бронзовом и железном веках. Подобная периодизация имеет в своей основе овладение технологиями обработки различных материалов, подчинение их человеческой воле, и, разумеется, венцом творения в таком случае становится современная фабрика. Сегодня, когда ИТ-гиганты бросили вызов мировому экономическому могуществу фабрикантов, появилась возможность иного взгляда на историю — построение периодизации на базе развития технологий обработки информации. На смену каменному, железному и бронзовому веку, изобретённым в эпоху индустриальной революции, грозят прийти век устной речи, век письменности, век книгопечатания, эпоха интернета[233]. Производство человека, воспроизводство человечества — это не только производство материальное, но и производство идей, знаний, технологий, именно поэтому технологии, используемые тем или иным обществом для обработки информации, возможно, в не меньшей мере характеризуют общество, чем технологии, используемые для изготовления орудий. Если взглянуть сквозь

призму этого подхода на эпоху промышленной революции, то можно сказать, что она стала также первой революцией больших данных. Ян Макдугалл Хакинг, канадский специалист в области философии науки, называет процесс, развернувшийся в 1820–1840 гг., «лавиной печатных чисел». В этот период, по подсчётам учёного, количество напечатанных чисел росло в экспоненциальной прогрессии, в то время как количество печатных слов — только в линейной[234].

Предпосылки революции больших данных можно обнаружить в высказываниях её предвестников. На границе XVII–XVIII вв. Лейбниц писал, что новое прусское государство должно начаться с создания статистического бюро, потому что истинной мерой государственной власти является население. Лейбниц сформулировал эту идею приблизительно в 1685 г., через несколько лет после того, как Уильям Петти высказал аналогичную рекомендацию для Англии. Лейбниц видел роль центрального статистического бюро в том, чтобы служить различным ветвям администрации. Бюро должно вести общий реестр смертей, крещений и браков, используя собранную информацию для оценки численности населения и, следовательно, мощи государства. Задача прямого подсчёта населения тогда считалась невыполнимой. Впрочем, передовые идеи медленно пробивали себе дорогу. На протяжении XVIII в. проекты по сбору статистической информации о населении и экономике в ведущих европейских странах были уделом различных ведомств (например, торговых) и даже частных исследователей. Появление первых центральных статистических бюро относится к первой половине XIX в. Например, в Прусском королевстве указ о создании такого бюро был издан в 1805 г., Управление записей актов гражданского состояния Англии и Уэльса (General Register Office for England and Wales) образовано в 1836 г., Бюро переписи населения США (United States Census Bureau) — в 1840 г. Словом, на воплощение в жизнь идей Петти и Лейбница ушло почти полтора столетия.

В 1860 г. основатель саксонского статистического бюро, экономист и статистик Эрнст Энгель был приглашён на пост директора прусского статистического бюро. Своё 22-летнее пребывание на этом посту учёный начал в том числе с основания трёх новых периодических изданий, в одном из которых опубликовал 21-страничный список 410 регулярных статистических сборников, издаваемых центральным правительством в Берлине. Для сравнения: в 1800 г. этот список был бы пустым[235].

В 1833 г. в Великобритании возникло Манчестерское статистическое общество, а год спустя — Королевское статистическое общество. В числе его основателей, между прочим, были Чарльз Бэббидж и Томас Мальтус, основатель мальтузианства — теории, согласно которой неконтролируемый рост населения должен привести к голоду на Земле.

Рост объёмов статистических данных требовал создания эффективных механизмов для их обработки. Переписи населения в условиях его быстрого увеличения в XIX в. становились всё более сложными и затратными мероприятиями, что заставляло их организаторов идти на беспрецедентные доселе и весьма

2.5

Табулятор Холлерита

радикальные для своего времени меры: например, в ходе переписи населения США в 1880 г. женщинам впервые разрешили быть счётчиками. Однако, несмотря на это, обработка результатов растянулась почти на десятилетие. Поскольку переписи в США проводились каждые десять лет, возникла реальная угроза того, что данные, собранные в 1890 г., вообще не удастся обработать в десятилетний срок, а это, в свою очередь, грозило полным коллапсом переписной системы. Становилось очевидным, что здесь необходимо революционное решение проблемы, и оно вскоре последовало.

В 1879 г. одарённый юноша Герман Холлерит, сын немецких иммигрантов, с отличием окончил Школу горного дела при Колумбийском колледже* в Нью-Йорке (правда, со сниженными отметками по бухгалтерскому учёту и механике) и поступил на работу в Вашингтоне в качестве специального агента для Бюро переписи населения США. На эту работу Холлерита устроил его бывший преподаватель, профессор Уильям Троубридж, работавший в Бюро экспертом. В связи с готовящейся переписью 1880 г. организация нуждалась в сотрудниках с математическими и инженерными способностями.

Хотя сама перепись заняла всего несколько месяцев, последующая работа по составлению таблиц и анализу данных требовала многих лет кропотливого труда большого коллектива сотрудников, ввиду чего отчёты о переписи к моменту их выхода сильно устаревали.

В свободное время Холлерит помогал в составлении отчётов доктору Джону Биллингсу, главе отдела статистики естественного движения населения. Биллингс был благодарен Герману за помощь и пригласил его к себе на ужин. Этот ужин (в августе 1881 г.) стал поворотным моментом в жизни Холлерита, о котором он вспоминал позже[236]: *«В один из воскресных вечеров мы сидели за чайным столиком доктора Биллингса, и он сказал мне, что необходима машина для осуществления чисто механической работы по составлению таблиц численности населения и аналогичных статистических данных. Мы говорили об этом, и я помню его идею о чём-то похожем на машину для сортировки типографских литер. Он думал о том, чтобы использовать карты с описанием индивида, выполненным при помощи вырезов на краю карты… Изучив вопрос, я вернулся к доктору Биллингсу и сказал, что, по моему мнению, я могу решить эту проблему, и предложил ему присоединиться ко мне. Доктор сказал, что ему интересно лишь увидеть работающее решение проблемы»*[237].

Принявшись за самостоятельное решение проблемы, Холлерит изучил процедуру переписи. На первом этапе счётчики посещали каждое домохозяйство и записывали ответы на свои вопросы на больших переписных листах (schedules). Заполненные переписные листы отправлялись обратно в Вашингтон, где армия клерков переписывала ответы в листы учёта (tally sheets). Например, для каждого переписного листа белого мужчины в маленькую ячейку на листе учёта ставилась отметка в виде косой черты, всего в ячейке могло содержаться до пяти отметок. Общее количество отметок было

* В период с 1784 по 1896 г. Колумбийским колледжем назывался будущий Колумбийский университет.

несложно подсчитать, поскольку форма была разделена на большие ячейки, каждая из которых содержала определённое число маленьких. Клерки подсчитывали количество отметок и записывали его в нижней части листа. На следующем этапе суммы из листов учёта переносились в сводные таблицы, суммарные показатели которых соответствовали численности населения округа, штата и, наконец, всей страны.

В переписи 1880 г. использовалось шесть видов листов учёта, по одному для каждой крупной статистической классификации. В первом листе население было разбито на группы по полу, расе и месту рождения; в других листах эти данные сопоставлялись с грамотностью, профессией и другими характеристиками. Для каждого из типов подсчёта сотрудникам приходилось заново перебирать миллионы переписных листов — процесс чрезвычайно медленный и дорогостоящий, не говоря уже о вероятности ошибок. Более того, он не позволял осуществлять сложный анализ данных.

Практически вся подготовительная работа и работа после переписи осуществлялась вручную. Единственным используемым механическим устройством было простое приспособление, так называемое устройство Ситона, изобретённое Чарльзом Ситоном, главным клерком переписи. Оно состояло из сплошного рулона листов учёта, намотанного на набор катушек в деревянной коробке. Рулон зигзагообразно огибал катушки устройства, собирая, таким образом, несколько столбцов листов рядом, что позволяло ускорить простановку отметок. Заполненные рулоны изымались из коробки, разрезались на отдельные листы, значения из которых затем суммировались[238].

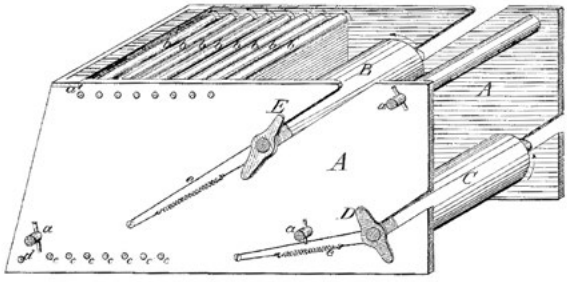


Рис. 30. Устройство Ситона

В своё время руководитель предыдущей переписи Фрэнсис Уокер сравнил результаты использования устройства Ситона с обычным способом обработки данных и обнаружил, что машина повысила производительность каждого клерка с 29 до 124 листов в день, то есть прирост производительности труда составил почти 428%. Хотя более поздний анализ показал, что эта оценка была сильно преувеличена, специальным актом Конгресса Ситону за его изобретение выплатили премию в размере 15 000 долларов (расчёт размера вознаграждения основывался на ожидаемой экономии, возникающей при использовании устройства; эта сумма равна годовому окладу 29 клерков)[239, 240]. В целом устройство Ситона не могло решить возникшую проблему. В 1880 г. число вопросов переписи в очередной раз возросло — с восемнадцати до двадцати четырёх, к тому же вырос спрос на получение более детальной статистики. Рос аппетит Конгресса к получению новых данных, и конгрессмены были готовы выделить дополнительные фонды на их сбор и обработку, а Уокер с энтузиазмом относился к возможности расширения штата. В итоге объём

2.5

Табулятор Холлерита

опубликованных результатов переписей увеличился с пяти томов разного размера в 1870 г. до двадцати двух толстых ин-кварто* томов в 1880 г. (да ещё и с приложением). Эта амбициозная программа потребовала значительного увеличения числа клерков, и их численность выросла с 438 человек в переписи 1870 г. до 1495 человек при подведении итогов переписи 1880 г.[241]

В 1882 г. Холлерит становится инструктором по машиностроению в Массачусетском технологическом институте, где начинает строить свой первый аппарат для суммирования и классифицирования данных. Спустя год он возвращается в Вашингтон, чтобы стать экспертом патентного ведомства. Правда, в отличие от Альберта Эйнштейна, проработавшего на аналогичной позиции семь лет, Холлерит увольняется, чтобы начать карьеру изобретателя и предпринимателя.

Первоначальный дизайн машины Холлерита предполагал использование перфорированной ленты. Не исключено, что это инженерное решение было навеяно конструкцией машины Ситона, но спустя более чем столетие трудно это достоверно установить. Сама по себе идея не нова, вспомним хотя бы Жака Вокансона, который использовал перфорированные полосы бумаги в своём станке. Принципиальной инновацией в случае Холлерита было использование

* Ин-кварто (лат. in quarto «в четвёртую часть листа», «в четвёртку» от лат. quartus «четвёртый») — полиграфический термин, обозначающий размер страницы в одну четверть типографского листа. На одном листе при этом помещается 4 листа (8 страниц) книги. Размеры страницы составляют 241,5 × 305 мм.

электричества: перфолента проходила между металлическим барабаном и большими металлическими щётками; всякий раз, когда щётки сквозь отверстие соприкасались с поверхностью барабана, возникал электрический контакт, приводивший к увеличению значения счётчика, соответствующего определённой статистической категории. Несмотря на большой прогресс, достигнутый в сравнении с операциями, выполняемыми при помощи листов учёта, Холлерит вскоре понял, что совершил серьёзную ошибку: бумажная лента оказалась неудачным носителем информации, ограничивающим скорость и гибкость системы из-за необходимости только последовательной обработки данных. Таким образом, если нужна только часть данных с ленты, приходилось проматывать рулон целиком, а после нахождения данных не было возможности их как-либо извлечь для дальнейшего анализа (разве что вырезать их с ленты)[242]. Казалось, Холлерит зашёл в тупик, забыв об идее Биллингса о картах с насечками. Однако на помощь пришёл любопытный случай во время одного путешествия. Холлерит вспоминал позже: *«…У меня был билет с тем, что, как я думаю, называлось перфорационной фотографией. Когда билет первый раз предъявлялся кондуктору, он, пробивая в нём отверстия, формировал описание человека, например: светлые волосы, тёмные глаза, большой нос и т. д. Таким образом, как вы видите, я лишь выполнил перфорационные фото каждого человека»*[243, 244]. Таким образом, система, созданная для борьбы с воровством билетов, помогла изобретателю создать более элегантную конструкцию машины, перейдя от непрерывной ленты к перфорационным учётным карточкам каждого человека.

Рис. 31. Фото проездного билета

Интересно, что Холлерит не был первым исследователем, осознавшим всю мощь перфокарт в деле обработки больших объёмов данных. Ещё в первой половине XIX в. русский изобретатель Семён Корсаков сконструировал несколько механических устройств, основанных на использовании перфорированных таблиц и предназначенных для задач информационного поиска и классификации. Первое устройство Корсакова получило название «гомеоскоп» (от др.-греч. ὅμοιος — подобный и σκοπέω — смотреть). Самый простой вариант гомеоскопа представлял собой деревянный брусок с отверстиями, в которых находились штыри длиной немного больше толщины бруска. Один конец у каждого штыря был закруглён, и при надавливании на него противоположный конец штыря выдвигался с другой стороны бруска. Каждый штырь соответствовал какому-либо признаку некоторого объекта. Если конец штыря выступал из рабочей поверхности бруска, значит, у данного объекта соответствующий признак присутствовал, в противном случае — отсутствовал.

Гомеоскоп использовался для быстрого поиска объекта в перфорированной таблице. Каждая строка такой таблицы соответствовала объекту, а столбец — признаку. Например, в одном из экспериментов Корсакова объектом

была болезнь, а признаками — наблюдаемые симптомы. Вначале надо было подготовить таблицу: при наличии у объекта некоторого признака проделывалось отверстие в соответствующей им ячейке таблицы. После этого можно было осуществлять поиск объекта: в гомеоскопе устанавливался соответствующий признакам набор штырей, и гомеоскоп, перемещаемый вдоль строк таблицы, останавливался, если для всех выдвинутых штырей в таблице находились соответствующие отверстия. Если же гомеоскоп доходил до конца таблицы, то это означало, что объект, обладающий всеми заданными при помощи штырей признаками, пока что не внесён в таблицу. Таким образом, используя гомеоскоп, можно было найти болезнь по набору наблюдаемых симптомов и узнать список рекомендуемых при ней лекарств, который записывался в дополнительном столбце таблицы.

Этот вариант гомеоскопа назван у Корсакова «прямолинейным гомеоскопом с неподвижными частями» (homéoscope rectiligne à pièces fixes). Более продвинутой версией гомеоскопа стал «прямолинейный гомеоскоп с подвижными частями» (homéoscope rectiligne à pièces mobiles). Он представлял собой стоящую раму, через центр которой вертикально была протянута толстая прямая проволочная ось. На неё были нанизаны рычажки, изготовленные из загнутых под прямым углом отрезков проволоки. У каждого рычажка один конец представлял собой крючок, который скользил по поверхности перфорированной таблицы, а на второй конец крепилась бирка с номером признака. Каждый из рычажков путём поворота мог быть перекинут на одну из сторон рамы. Если он опирался на левую сторону рамы, то крючок выступал из нижней плоскости устройства и при движении рамы по поверхности таблицы мог провалиться в соответствующее ему отверстие. Если же отверстие в соответствующей позиции отсутствовало, то крючок приподнимался, в результате чего поднималась и бирка, закреплённая на другом конце рычажка. Таким образом, эта версия гомеоскопа могла не только находить нужные записи, но и показывать при поиске отсутствующие у обрабатываемой записи признаки.

Следующим устройством Корсакова стал «плоский гомеоскоп» (homéoscope plane), состоящий из наложения друг на друга двух перфорированных таблиц. Одно измерение таблицы соответствовало локализации симптома (например, голова, нос, грудь, живот), а второе — типу симптома (боль, резь, покраснение и т. д.). Штыри, соответствующие искомым признакам (критериям), похожие на гвозди со шляпками, устанавливались в отверстие верхней таблицы. Затем верхняя таблица накладывалась на нижнюю, в результате чего штыри или проваливались в соответствующие отверстия второй таблицы, или приподнимались над поверхностью. Корсаков предлагал использовать размер или цвет шляпок штырей для обозначения степени важности соответствующих им поисковых признаков.

Корсаков создал также и более сложные устройства — «идеоскоп» (idéoscope) и «простой компаратор» (comparateur simple). Идеоскоп представлял собой усовершенствованную версию прямолинейного гомеоскопа с подвижными

частями, способную обрабатывать таблицы, в которых существовало два типа отверстий — неглубокие и глубокие (соответствующие более важным признакам). Идеоскоп позволял увидеть признаки, совпадающие у двух объектов (с выделением наиболее важных); признаки искомого объекта, отсутствующие у сравниваемого объекта в таблице; признаки сравниваемого объекта, которых нет в искомом объекте (с выделением наиболее важных), а также признаки, отсутствующие у обоих объектов.

Компаратор же, состоявший из двух накладываемых друг на друга рамок со смещаемыми дощечками, позволял сравнивать две записи, каждая из которых задавалась динамически, без использования перфорированной таблицы.

В 1832 г. Корсаков издал на французском языке брошюру под названием «Начертание нового способа исследования при помощи машин, сравнивающих идеи» (Apercu d'un procédé nouveau d'investigation au moyen de machines à comparer les idées)[245] и в том же году представил свои изобретения на суд Императорской Академии наук в Санкт-Петербурге. Однако члены Академии не оценили идей Корсакова. В заключении комиссии было среди прочего сказано: *«Г-н Корсаков потратил слишком много разума на то, чтобы научить других обходиться без разума»*[246, 247]. На многие годы изобретения Корсакова были забыты, и идее обработки массивов данных при помощи перфорированных карт было суждено воплотиться в жизнь лишь благодаря усилиям Холлерита.

В 1889 г. новый руководитель переписи Роберт Портер организовал конкурс на лучшую систему для автоматизации обработки данных. На призыв Портера откликнулись три изобретателя, каждый из которых разработал собственные приспособления. Чарльз Пиджин, главный клерк Массачусетского бюро статистики труда, создал систему, использующую разноцветные картонные карточки (chips), соответствующие различным классам информации. Данные переписи заносились на карточки, которые затем сортировались по стопкам и подсчитывались. Система Пиджина успешно использовалась во время переписи населения штата Массачусетс в 1885 г.

Уильям Хант, работавший над той же переписью, предложил упрощённую версию системы Пиджина, в которой вместо картонных карточек использовались бумажные бланки с отметками, выполненными цветными чернилами. Третьим участником стал Холлерит, новая машина которого, использовавшая перфокарты, к этому моменту уже была испытана при анализе записей о смерти в Балтиморе, Нью-Йорке и Нью-Джерси в 1886–1889 гг.[248] Кроме того, машина Холлерита прошла испытания в военном ведомстве с целью составления таблиц о здоровье военнослужащих[249].

Все три системы были основаны на концепции «единичных записей» (unit records), представлявших собой отдельные записи для каждого объекта учёта. Во всех трёх системах информация о каждом индивиде переносилась из переписного листа на отдельные карточки из бумаги или картона. Вместо того чтобы использовать отметки в огромных листах учёта, производилась

сортировка учётных карточек. Копирование информации на первом этапе добавляло дополнительный шаг к процессу, но позволяло увеличить эффективность всякий раз, когда было необходимо составить несколько таблиц для группы, выделенной на основе какой-либо характеристики. Например, после того как записи отсортировали по расе, полу и возрасту, эти группы можно было повторно использовать для составления таблиц с детализацией этих базовых групп на подгруппы по возрасту, месту рождения или профессии. В рамках традиционной системы подсчёта каждая новая таблица начиналась с нуля, что означало повторение одной и той же работы снова и снова.

Чтобы выбрать наиболее эффективную систему, Портер сформировал комитет для проведения конкурса. Каждый участник должен был перенести информацию о 10 491 жителе Сент-Луиса из переписи 1880 г. на свои карточки, бланки или перфокарты, а затем составить набор таблиц. Холлерит со своим табулятором оказался явным победителем. Итоги конкурса представлены в таблице:

	Перенос данных, ч	Табуляция, ч	Всего, ч
Карточки Пиджина (chips)	110,9	44,7	155,6
Бланки Ханта (slips)	144,4	55,4	199,8
Перфокарты Холлерита (cards)	72,5	5,5	77,9

Как можно заметить, перенос данных на перфокарты осуществлялся быстрее, чем на цветные карточки или бланки. Первоначально Холлерит считал, что *«отверстия в картах можно пробивать при помощи обычного кондукторского компостера»*. И действительно, он использовал такой компостер для переноса данных на карты в Балтиморе. Но в ходе проекта для военного ведомства Холлерит задействовал более эффективное устройство — пантограф, созданный с помощью Джорджа Бонда, известного специалиста компании Pratt & Whitney из Хартфорда. Оператор перемещал ручку над металлической пластиной, пронизанной мечеными отверстиями, соответствующими положениям отверстий в карте. Перфорации в карте выполнялись путём вжатия ручки в соответствующее отверстие пластины.

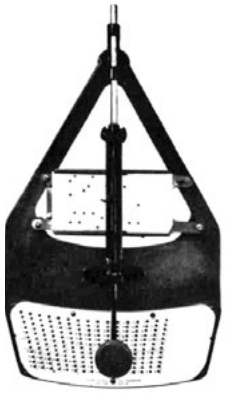


Рис. 32. Пантограф Холлерита

Однако наиболее впечатляющее преимущество система Холлерита продемонстрировала на этапе составления таблиц: подсчёт перфокарт был в десять раз быстрее подсчёта бланков и в восемь раз быстрее подсчёта карточек.

На каждой перфокарте, используемой табулятором Холлерита, отводилось место для 288 отверстий, при этом значение каждого из отверстий определялось его позицией. Центральным элементом машины был замыкающий

контур пресса, напоминавший вафельницу. Верхняя часть пресса содержала подпружиненные штифты, по одному на каждое возможное отверстие в карте. В нижней части располагались маленькие чашечки, заполненные ртутью. Оператор помещал перфокарту в пресс и закрывал крышку. Большая часть штифтов натыкалась на картон и оставалась в поднятой позиции, но там, где в карте были пробиты отверстия, штифты проходили через них и попадали в ртутные чашечки, образуя тем самым электрическую цепь. Ток активировал электромагниты, которые проворачивали диски счётчиков. Машина настраивалась для работы с отдельными отверстиями или их комбинациями. Она позволяла за один проход осуществлять подсчёт до сорока характеристик или их сочетаний. Каждый из счётчиков мог подсчитать до 9999 значений; при достижении этого предела оператор переписывал показания со всех счётчиков на бумагу, а затем сбрасывал их значения.

В дополнение к функции подсчёта табулятор мог выполнять сортировку карт, для чего использовалась сортировочная коробка, разделённая на 24 отсека с подпружиненными крышками, открывающимися при помощи электромагнитов. Табулятор открывал отсек для размещения карточки на основании заданной характеристики или комбинации характеристик. Используя функции сортировки и подсчёта одновременно, карты можно было отсортировать и подсчитать за один прогон. После чего отсортированные карточки могли быть снова загружены в машину, что позволяло использовать сложные перекрёстные классификации[250]. Это, казалось бы, нехитрое устройство и обеспечило Холлериту уверенную победу.

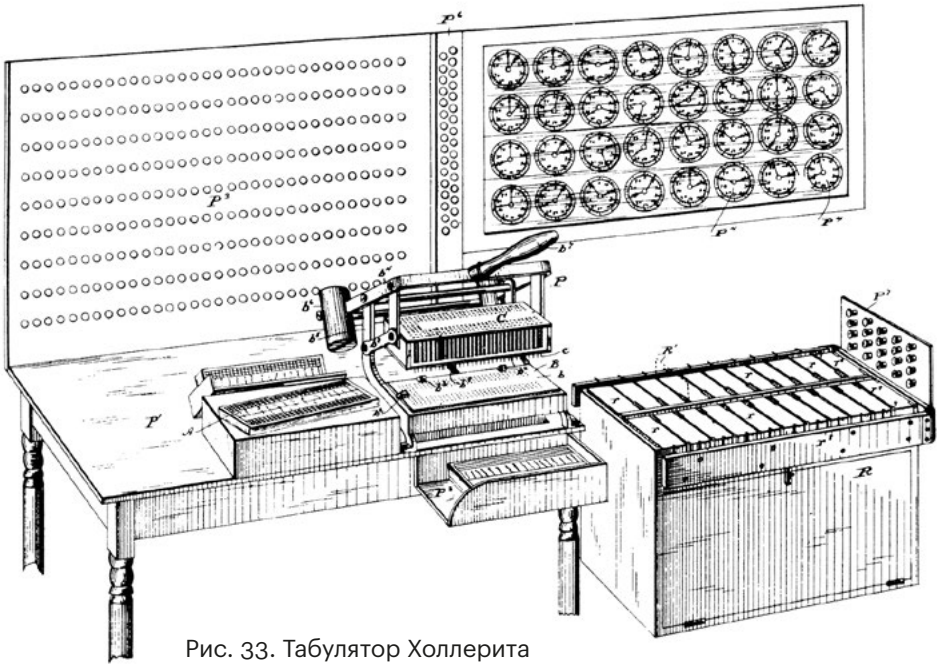


Рис. 33. Табулятор Холлерита

К счастью для прогресса, конкуренты Холлерита быстро оправились от поражения и в будущем подарили миру множество замечательных работ и изобретений. Например, Пиджин в 1916 г. подал заявку на патент, описывающий новый способ показа диалога в немых фильмах. Актёры должны были надувать воздушные шары или надувные язычки с текстом, тем самым изображая разговор[251].

Клерки, использующие машины Холлерита для обработки данных переписи 1890 г., смогли обрабатывать в среднем от 7000 до 8000 перфокарт в день. В соответствии с выполненными расчётами использование машин Холлерита должно было сэкономить 580 000 долларов на заработной плате клерков; Холлериту выплатили 230 390 долларов в качестве арендной платы за 56 машин в течение четырёх лет, что составило почти 40% от этой суммы. Машины возвратили Холлериту в 1894 г., когда обработка результатов переписи завершилась.

В преддверии переписи 1900 г. Бюро объявило новый конкурс на лучшую систему автоматизации. На этот раз единственными конкурентами были Холлерит и Пиджин. Пиджин предложил сразу три новые системы: «Автоматическая механическая система табуляции» (Automatic Mechanical Tabulation System), «Электрическая система табуляции на основе коммутационной доски» (Pin Board Electrical Tabulation System) и «Электрический печатающий табулятор» (Electrical Typewriter Tabulator). Холлерит испытывал настолько серьёзные опасения в отношении этих новых устройств, что нанял детективов из агентства Пинкертона для промышленного шпионажа. Впрочем, тревога оказалась напрасной: машины Холлерита позволили подвести итоги тестовой переписи конкурса менее чем за половину времени, потраченного лучшей из машин Пиджина.

В ходе подведения итогов переписи Холлерит представил несколько нововведений. К числу наиболее важных из них относилась «Автоматическая табулирующая машина», в которой работа по помещению каждой из карт в отсек со штифтами, опусканию пресса и удалению карты выполнялась автоматически, что позволило ускорить процесс в шесть раз.

Для обработки данных сельскохозяйственной переписи Холлерит разработал «Суммирующий табулятор», который не только подсчитал количество ферм, но вычислил суммарную площадь их земель и общий объём производства. Кроме того, Холлерит использовал новый кнопочный перфоратор и автоматическую сортировочную машину[252]. Взятые вместе, эти новые устройства значительно улучшили технологию, использованную в 1890 г., что позволило опубликовать результаты переписи в рекордный с 1820 г. срок, а также сократить расходы на перепись в расчёте на единицу населения более чем на 15%[253].

В 1903 г. на смену поддерживавшему Холлерита директору Бюро переписи населения Уильяму Мерриаму пришёл Саймон Норт. Норт и Холлерит не ладили друг с другом: Холлерит выступал против назначения Норта, а Норт считал плату за аренду машин Холлерита непомерной. Конфликт привёл к отказу Бюро от использования машин Холлерита и переходу на короткое время к применению более медленных устройств Пиджина. Норт считал, что с созданием постоянного Бюро переписи в 1902 г. появилась необходимость в использовании собственного оборудования. Срок действия первоначальных патентов Холлерита истекал 8 января 1906 г., открывая всем желающим дорогу для изготовления аналогичных табуляторов.

В 1905 г. Норт добивается от Конгресса выделения 40 000 долларов для разработки собственного оборудования. Эти средства были использованы для создания мастерской переписных машин два года спустя. Бюро переписи наняло четырёх недостаточно лояльных инженеров Холлерита, назначив их руководителем иммигранта из Одессы Джеймса Пауэрса, выпускника Одесского технического училища и бывшего сотрудника механической мастерской, занимавшейся изготовлением оборудования для Императорского Новороссийского университета в Одессе[254]. (К сожалению, биографические данные о Пауэрсе крайне скудны. Вполне вероятно, что до переезда в США он был Яковом или Хаимом, Силиным или Силаевым, но мне пока не удалось разыскать никаких подробностей его доамериканской жизни. Парадоксальным образом мы крайне мало знаем о человеке, стоявшем у основания компании, ныне известной под названием Unisys Corporation, наследницы Powers Accounting Machine Company[255].)

Менее чем за год группе Пауэрса удалось разработать прототипы, обладавшие некоторыми преимуществами по сравнению с машинами Холлерита. Новый табулятор самостоятельно печатал результаты подсчётов на бумаге. Также Пауэрс создал новый электрический перфоратор с 240 клавишами, по одной для каждого отверстия на перфокарте, который обещал удвоить скорость ввода данных по сравнению с перфоратором Холлерита. Кроме того, мастерская переписных машин начала работу над полностью автоматическим табулятором, который должен был, подобно последним версиям машины Холлерита, обрабатывать стопки перфокарт без вмешательства оператора[256].

Холлерит был в ярости. Убеждённый в том, что его патенты нарушены, он инициировал лоббистскую кампанию против Норта. Враждебно относившийся к монополиям президент Рузвельт не спешил поддерживать Холлерита, но после того, как в 1909 г. Рузвельта на его посту сменил Тафт, Холлериту всё же удалось добиться увольнения Норта.

Новый директор Бюро переписи Эдвард Дюран тем не менее решил продолжить развитие собственных технологий. Менее чем за три месяца до начала переписи 1910 г. Холлерит подал иск против Дюрана, заявив о нарушении патентов на машины для сортировки карт. Получив запретительный судебный приказ, Холлерит добился приостановления работ над машинами, но потом суд округа Колумбия отменил приказ, после чего в иске было отказано[257].

После утраты государственного контракта Холлерит принимает решение завершить самостоятельную предпринимательскую карьеру, начатую в 1896 г. созданием компании Tabulating Machine Company (после 1905 г. — The Tabulating Machine Company). В 1911 г. изобретатель продаёт свой бизнес Чарльзу Флинту, знаменитому «отцу трестов». Флинт объединил The Tabulating Machine Company с ещё двумя приобретёнными им фирмами под названием Computer Tabulating Recording Company, а в 1924 г. компания сменила название на International Business Machines Corporation, или сокращённо IBM[258].

Рис. 34. Автоматизация переписи в США

Холлерит продолжал работать с основанной им компанией в качестве инженера-консультанта до 1921 г., но всё меньше и меньше занимался делами фирмы. После выхода в отставку он переселился на свою ферму в Мэриленде, где и провёл остаток жизни, сконцентрировавшись на выращивании крупного рогатого скота.

По словам немногих близких людей, Холлерит был «странным», «особенным», «закрытым», «малодоступным», «живущим только для своей семьи и работы». Ему нравились хорошие сигары, изысканное вино, коровы гернзейской породы и деньги, которых у него было предостаточно.

Герман Холлерит умер от сердечного приступа 17 ноября 1929 г. в Вашингтоне и был похоронен на семейном участке на кладбище Оак-Хилл в Джорджтауне.

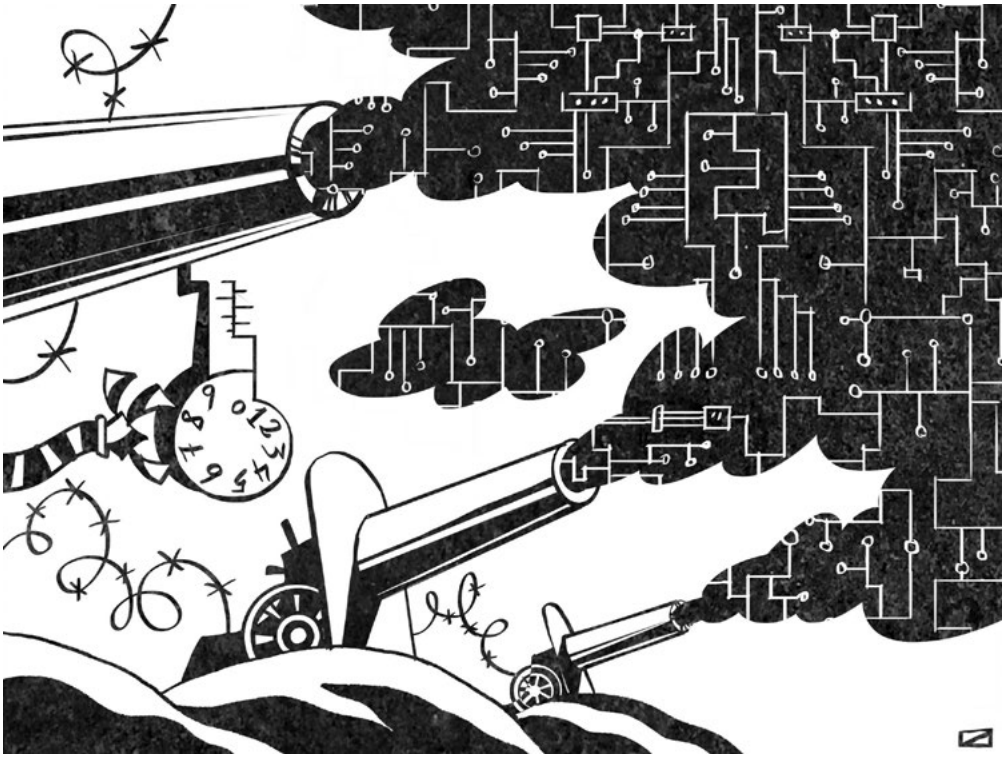
Холлерит считается одной из основных фигур в развитии обработки данных. Изобретение табулятора ознаменовало начало эпохи (полу)автоматических систем в этой области, а сформированная им концепция массовой обработки данных доминировала в этом направлении в течение примерно столетия[259].

2.6 Вершины механических вычислительных систем: военные баллистические вычислители

Третий правый ездовой, разворот налево! Батарея, к бою!
Трубка 15, прицел 120! Батарея, огонь! Бац! Бац! И мимо.

Яшка-артиллерист

Традиционно военная индустрия является одним из заказчиков передовых технических решений, поэтому неудивительно, что именно в военных механизмах технология механических вычислений была доведена до совершенства.



Наиболее важная часть любого механического компьютера — его передаточные механизмы. Используя комбинацию передаточных механизмов разных типов, механический компьютер может выполнять основные математические операции — сложение, вычитание, умножение и деление. Самый простой пример — использование передачи, состоящей из двух зубчатых колёс разного диаметра, позволяющей осуществить умножение или деление числа на некоторую константу. Например, если длины окружности колёс соотносятся как 1 : 2, то один поворот первого колеса будет соответствовать половине оборота второго, а значит, число поворотов второго колеса будет равно числу поворотов первого колеса, делённому на 2 или умноженному на 0,5. Причём верно это и для неполного числа оборотов.

Зубчатое колесо может примыкать к зубчатой рейке, такая передача называется реечной. Она позволяет преобразовать круговое движение зубчатого колеса в линейное движение рейки и наоборот.

Дифференциал, используемый в трансмиссии автомобиля, позволяет ведущим колёсам машины вращаться с разной скоростью без пробуксовки, а в механических компьютерах — осуществлять сложение и вычитание. Дифференциал с двумя входными валами позволяет получить на выходе среднее арифметическое двух чисел, соответствующих градусу поворота каждого из валов. Если это значение удвоить, можно получить сумму двух чисел. Например, если один входной вал совершает три оборота, а другой — один, то шестерни дифференциала заставят выходной вал повернуться дважды: $(1 + 3) / 2 = 2$.

Подобные механизмы годятся для простых арифметических действий, но для функций более высокого порядка, например для расчёта баллистических кривых, механические компьютеры нуждаются в более сложных деталях. Некоторые сложные функции можно вычислять при помощи вращающихся поверхностей. Представьте себе кулачок, переменный радиус которого, соответствующий углу x, равен, например, x^2. Поворачиваясь, такой кулачок

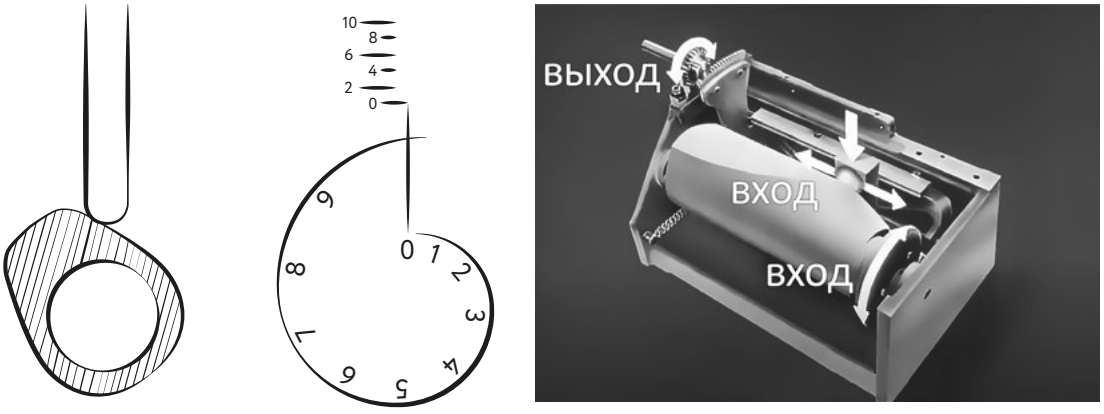


Рис. 35. Вращающиеся поверхности для вычисления различных функций

будет перемещать примыкающую к нему рейку на расстояние, равное квадрату угла поворота кулачка. Аналогичным образом можно представить и более сложные функции, например тригонометрические. Чтобы увеличить область определения функции, кулачок можно заменить на диск со спиралевидным жёлобом, в который будет входить боковой выступ рейки. Добавив кулачку «глубину», можно получить барабан, воплощающий в своей форме функцию двух переменных.

Все эти механические ухищрения были известны, по всей видимости, ещё создателям первых астрономических калькуляторов, хотя точность обработки деталей и была далека от той, которая стала возможной при использовании инструментов индустриальной эпохи. Но есть ещё один элемент, позволяющий собрать воедино всё необходимое для выполнения сложных вычислений при прогнозировании местоположения цели в баллистических расчётах, и этот элемент — интегратор. Это устройство, которое использует различные скорости вращения диска, чтобы выполнять роль бесступенчатой дифференциальной передачи.

Изначально разработанный профессором Джеймсом Томсоном из Белфаста в 1876 г. интегратор был усовершенствован его братом сэром Уильямом Томсоном, будущим лордом Кельвином, в качестве «анализатора гармоник» (harmonic analyzer). Это устройство предназначалось для прогнозирования высоты приливов: основываясь на таблице последовательных замеров приливных высот в той или иной гавани, анализатор гармоник вычерчивал на бумаге кривую будущих приливов и отливов как функцию времени. Устройства подобного типа вскоре получили широкое распространение, поскольку позволяли создавать приливные таблицы с минимальными трудозатратами. Спустя более чем полвека анализатор гармоник использовался при планировании высадки союзников в Нормандии, тем самым внеся непосредственный вклад в исход Второй мировой войны.

Однако потенциал применения в военно-морском ведомстве созданного Томсоном механизма простирался гораздо дальше решения задачи построения приливно-отливных таблиц. Война начала XX в. уже оделась в стальную броню дредноутов и дышала огнём циклопических дальнобойных орудий. Военно-промышленные комплексы ведущих стран ввязались в изнурительное состязание, стремясь выжать максимум из доступных к тому времени технологий. При километровых дистанциях огня, чудовищной разрушительной мощи артиллерии (платой за которую становились её сравнительно низкая скорострельность и ограниченный боезапас) особенное значение приобретала точность огня, а она-то как раз оставляла желать лучшего.

В 1900 г. Артур Поллен, управляющий директор The Linotype Company, выпускающей полиграфическое оборудование (в правлении которой на тот момент состоял лорд Кельвин), приехал на Мальту навестить родственников. Его двоюродный брат Уильям Гуденаф, лейтенант-коммандер * на крей-

* Lieutenant Commander, соответствует званию капитана третьего ранга или армейского майора.

сере «Дидо» (HMS Dido), пригласил Артура посмотреть на учебные стрельбы в море[260]. Поллен поинтересовался, почему корабль выполнял стрельбы с дистанции около 1400 ярдов *, в то время как на суше аналогичные орудия вели огонь по позициям буров в Южной Африке с дистанции около 8000 ярдов **. Гуденаф ответил, что всему виной неадекватные средства определения дальности от «Барр и Страуд» (Barr & Stroud), которые не пользовались любовью и доверием британских военных.

Поллен заинтересовался вопросом определения дальности. Чтобы представить задачу стрельбы в графическом виде, Артур нарисовал пути кораблей, идущих со скоростью 25 узлов *** навстречу друг другу. На него произвело впечатление то, как быстро изменялась дистанция между кораблями: позже он заявлял, что первым понял важность величины изменения расстояния (range rate). Поллен рассматривал графическое построение в качестве способа визуализации и вычисления расстояния, однако на практике решение этой задачи столкнулось с рядом инженерных трудностей. Например, скорость реакции магнитных компасов была недостаточной, чтобы компенсировать отклонение корабля от курса.

Опираясь на ресурсы фирмы, Поллен разработал дальномер, действующий по принципу двух наблюдателей: дирекционные углы (углы направления на цель) замерялись одновременно из двух разнесённых постов наблюдения, а затем передавались на дальномерную машину. В начале 1901 г. Поллен первый раз обратился в Адмиралтейство, представив эскиз вычислительной машины. В своём обращении он, в частности, писал, что *«наблюдение в течение восьми секунд… с помощью телескопических прицелов… не должно быть трудным делом»* и что *«были сделаны важные изобретения… для объединения подзорной трубы с одним или несколькими гиростатами»* ****. За письмами последовала брошюра, в которой декларировалось, что при 150 футах ***** между постами наблюдения точность определения направления может всё ещё приводить к ошибкам расчёта дальности в 621 ярд ****** на 20 000 ярдов ******* расстояния.

Адмиралтейство отклонило предложение Поллена, несмотря на поддержку лорда Уолтера Керра, друга семьи Поллена и его единоверца (они были католиками), занимавшего в то время пост Первого морского лорда. Основной причиной отказа, по всей видимости, был тот факт, что ещё в 1892 г. в ходе испытаний на борту крейсера «Аретуза» (HMS Arethusa) дальномеры Уоткина, также использовавшие два поста наблюдения, показали неважные результаты, что и привело тогда к победе дальномеров Барра и Страуда[261].

* Примерно 1280 м.
** Примерно 7300 м.
*** Примерно 46,3 км/ч.
**** Гиростат (gyrostat) — модифицированный вариант гироскопа. Гироскоп — используемый для автоматического регулирования устойчивости прибор с диском и свободной осью, всегда сохраняющей неизменное положение.
***** Примерно 45 м.
****** Примерно 565 м.
******* Примерно 18 200 м.

2.6

Вершины механических вычислительных систем: военные баллистические вычислители

Однако Поллен всё же решил продолжать свою работу.

Завершив разработку конструкции вычислительной машины, Поллен и его инженеры обратились к гораздо более сложной проблеме одновременного получения и передачи дирекционных углов (пеленгов) цели. В двух брошюрах, выпущенных в 1904 г., описывались не только дальномер и вычислитель, но и чертёжный аппарат и «циферблат» (clock) — вычислительное устройство, сердцем которого был интегратор Томсона. Основываясь на полученных данных о расстоянии до цели, «циферблат» мог рассчитывать, как будут изменяться это расстояние и дирекционный угол цели с течением времени[262].

Артур Поллен не был единственным специалистом, работавшим в эти годы над вычислительными системами управления огнём на военных кораблях. В 1902 г. лейтенант-коммандер Джон Дюмареск предложил конструкцию портативного механического вычислительного устройства, получившего название «калькулятор Дюмареска» или просто «дюмареск». В калькулятор вводились курс и скорость корабля, курс и скорость цели, а также пеленг цели. Калькулятор выдавал величину изменения расстояния до цели и величину изменения дирекционного угла. Однако использование устройства требовало высокой квалификации наблюдателя, поскольку входные данные для расчётов вводились в калькулятор вручную и должны были измеряться с очень высокой точностью. Несмотря на отсутствие интеграции с другими системами корабля, калькуляторы Дюмареска получили широкое распространение на флоте. В последующие годы было создано множество улучшенных версий калькулятора, способных, например, учитывать поправку на ветер[263].

В 1904 г. Адмиралтейство провело серию опытов, в результате которой на вооружение был принят механический указатель дистанции производства оружейной компании «Виккерс» (Vickers), названный «циферблатом Виккерса» (Vickers Range Clock). В его основе лежала конструкция, разработанная Перси Скоттом. Устройство состояло из пружинного двигателя, который вращал стрелку по циферблату, проградуированному в тысячах ярдов. Наводчик устанавливал начальное значение дистанции до цели, а затем двигатель вращал стрелку со скоростью, соответствующей скорости изменения расстояния между кораблём и целью,

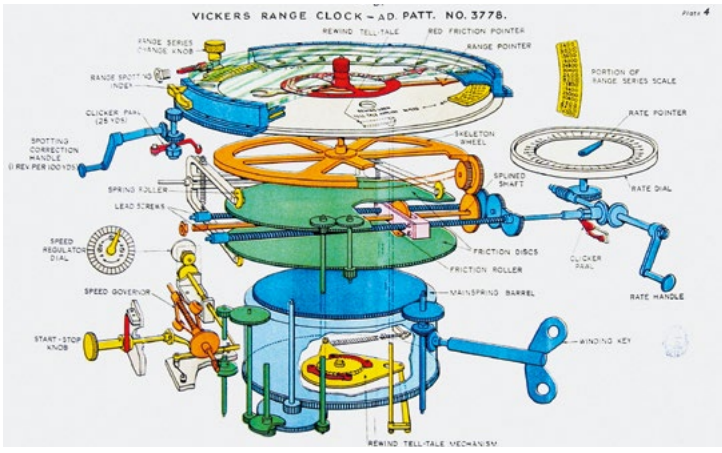


Рис. 36. Циферблат Виккерса

вычисленной при помощи калькулятора Дюмареска. Если скорость изменения расстояния до цели была постоянной или менялась по линейному закону, то циферблат выдавал правильную дистанцию до цели в любой момент[264].

Но вернёмся к Артуру Поллену. Итак, в 1904 г. Поллен впервые описал «циферблат», который предсказывал расстояние до цели и передавал его орудиям. Но изложенная концепция была неполной, поскольку циферблат имел шкалы для установки скорости и курса цели, но не для её пеленга. Также брошюра не содержала ни одного упоминания проблемы упреждения при стрельбе. Приблизительно одновременно с публикацией брошюры Поллен получил разрешение от вице-адмирала Чарльза Бересфорда обратиться за советом к артиллерийским специалистам из Флота Канала*. Результатом данных консультаций стала изданная в декабре новая брошюра, демонстрирующая более глубокое понимание автором всех факторов, оказывающих влияние при артиллерийском огне на дальние дистанции. Также в брошюре упоминаются наиболее современные на тот момент инструменты, в частности калькулятор Дюмареска и циферблат Виккерса. Кроме того, Поллен описывает концепцию циферблата, способного предсказывать изменение расстояния до цели и пеленга, а также предлагает создать отдельную машину для расчёта упреждения.

Одновременно с работами по развитию системы Поллен не оставляет попыток получить контракт от Адмиралтейства. 9 мая 1904 г. отчим Поллена, посвящённый теперь в рыцарское достоинство и ставший членом Парламента, обращается к Первому лорду Адмиралтейства Уильяму Палмеру, сообщая об успехах в создании вычислительной машины и намекая на то, что устройство может быть запатентовано и использовано в интересах иностранных флотов. 27 мая Поллен встречается с Генри Барри, возглавлявшим на тот момент Директорат морских боеприпасов и торпед (Directorate of Naval Ordnance and Torpedoes, DNO). В ходе беседы Поллену не удалось в полной мере убедить Барри заключить контракт, и после встречи отчим Поллена пишет ещё одно письмо Палмеру, снова намекая на возможность коммерциализации устройства и утраты Адмиралтейством шансов на приобретение монопольных прав.

Несмотря на все усилия Поллена и его отчима, реального прогресса в деле продвижения системы удалось достичь лишь годом позже, когда DNO возглавил Джон Джеллико. 3 апреля 1905 г. капитан** Эдвард Хардинг, один из помощников директора, представил весьма благожелательный отчёт о первичных испытаниях элементов системы Поллена на борту броненосного крейсера «Нарцисс» (HMS Narcissus), а месяцем позже условия Поллена были приняты. Подписанный контракт предполагал поставку не позднее 1 октября 1905 г. двух наблюдательных модулей с системами передачи пеленга, машины для расчёта дистанции на основе пеленгов и чертёжного устройства.

* Channel Fleet, старейший английский флот, чьей задачей являлась защита Британских островов со стороны Ла-Манша.

** Captain, соответствует званию капитана первого ранга или армейского полковника.

Поставленную систему планировали испытать на борту додредноутного линейного корабля «Юпитер» (HMS Jupiter).

Как это часто бывает, испытания продемонстрировали, что реальные достижения куда более скромны, чем амбиции изобретателя. Из-за проблем с синхронизацией пеленгов между постами наблюдения система не смогла обеспечить требуемой точности. Но, несмотря на неудачу, сотрудничество Поллена и Адмиралтейства продолжилось. Предложив временно отказаться от системы для измерения расстояний на основе данных двух наблюдателей, в 1906 г. Поллен подготовил предложения по созданию устройства для гироскопической стабилизации нового дальномера от Barr & Stroud и автоматического построителя курса. Адмиралтейство заказало новые приборы для испытания и согласилось с тем, что в случае размещения производственного заказа Поллен получит 100 000 фунтов стерлингов отчислений.

В январе 1908 г. адмирал флота Артур Уилсон провёл испытания оборудования Поллена на борту бронепалубного крейсера «Ариадна» (HMS Ariadne). В качестве помощника при проведении испытаний выступил недавно назначенный коммандером * Фредерик Дрейер[265]. Этому офицеру предстояло сыграть крайне важную роль в жизни Артура Поллена, судьбе его изобретений и развитии баллистических вычислительных устройств в XX в.

Фредерик Дрейер родился 8 января 1878 г. в ирландском городке Парсонстауне в графстве Кингс (ныне город Бирр, графство Оффали) в семье датского астронома Джона Луи Эмиля Дрейера, занимавшего пост директора Арманской обсерватории. Получив образование в Королевской школе города Арма, в 1891 г. Дрейер был зачислен в состав Королевского флота и поступил в Королевский военно-морской колледж в Дартмуте. Затем он служил мичманом на додредноутном линейном корабле «Ансон» (HMS Anson) и эскадренном броненосце «Барфлёр» (HMS Barfleur). Почти во всех своих последующих экзаменах на повышение он получал сертификаты первого класса — младшего лейтенанта, лейтенанта, а затем артиллерийского специалиста [gunnery lieutenant]. В 1900 г. он написал книгу «Как стать первоклассным в морском деле: руководство для мичмана Королевского флота» (How to Get a First Class in Seamanship: A Guide for Midshipmen of the Royal Navy). Он стал лучшим на продвинутом курсе для артиллерийских и торпедных лейтенантов в Королевском военно-морском колледже в Гринвиче в 1901 г., после чего был принят в состав персонала школы стрельбы в Ширнессе. Затем он служил офицером по стрельбе на крейсере «Сцилла» (HMS Scylla), бронепалубном крейсере «Хоук» (HMS Hawke) и додредноутном линкоре «Худ» (HMS Hood).

В 1903 г. Дрейера назначили артиллерийским офицером на недавно введённый в эксплуатацию додредноутный линкор «Эксмут» (HMS Exmouth). В 1904 г. «Эксмут» стал флагманом британского Флота метрополии (Home Fleet), после чего Дрейер получил пост советника по артиллерийской стрельбе у командующего — адмирала Артура Уилсона. С 1904 по 1907 г. «Эксмут»

* Commander, соответствует званию капитана второго ранга или армейского подполковника.

был первым в испытаниях и боевых методах стрельбы из Флота метрополии (позднее — Флот Канала). В 1905 г. Дрейер работал в калибровочном комитете под председательством контр-адмирала Перси Скотта, уже упоминавшегося нами как изобретателя прообраза циферблата Виккерса. Он был назначен офицером по экспериментальной стрельбе на «Дредноуте» (HMS Dreadnought) во время его испытательного похода 1907 г.[266]

Главным противником Поллена во время испытаний 1908 г. на борту «Ариадны» стало предубеждение адмирала флота Уилсона: по сути дела, тот уже решил, каким должен быть результат. Уилсон был убеждён, что более дешёвые ручные устройства могут быть не менее эффективными, чем дорогая система Поллена. В отличие от предыдущих тестов, здесь инструменты Поллена проявили себя с лучшей стороны, но производственный заказ не был размещён. Впрочем, в итоге Адмиралтейство всё-таки выделило Поллену некоторое количество денежных средств, чтобы дать ему возможность продолжить работу над системой[267].

В октябре 1907 г. Адмиралтейство ставило целью достичь погрешности не более 1% при измерении расстояния в 15 000 ярдов *. В то время это было не под силу инструментам, применявшимся на Королевском флоте. Растущие требования к точности и дальности стрельбы стимулировали разработку более сложных дальномерных инструментов как части артиллерийской системы корабля. В конце концов утвердилось понимание того, что большие военно-морские дальномеры не могут далее рассматриваться как инструменты, изолированные от прочего вооружения корабля[268].

В сентябре 1909 г. новые конструкции крепления дальномера и построителя курса были готовы к испытанию на крейсере «Наталь» (HMS Natal), которым командовал капитан Фредерик Огилви, признанный эксперт в области артиллерии. Под его командованием в 1909 г. «Наталь» одержал победу в соревнованиях флота по стрельбе [Gunlayer's Test]. Огилви ранее отвечал за эксперименты по управлению огнём на додредноутном линкоре «Ривендж» (HMS Revenge), где на собственном опыте убедился в неэффективности ручных методов и заинтересовался возможностью автоматизации. Он проявил интерес к разработкам Поллена и после испытаний высказал уверенность в том, что, несмотря на имеющиеся недостатки системы, в будущем её ожидает успех. В лице Огилви Поллен нашёл ценного союзника, поскольку ко мнению первого прислушивались лорды Адмиралтейства. Взгляды Огилви на работу Поллена разделял и контр-адмирал Людвиг фон Баттенберг, командующий Атлантическим флотом Великобритании (Atlantic Fleet). К сожалению, в декабре 1909 г. Огилви скоропостижно скончался от тифа[269].

Дальнейшим развитием системы Поллена стал циферблат Argo Clock Mark I **, появившийся на свет в начале 1910 г. В апреле того же года «Арго» получила производственный заказ на 45 гиростабилизированных креплений для дальномеров. Однако прототипы приборов оказались ненадёжными.

* Примерно 13 700 м.

** «Арго» здесь — название новой компании Поллена, созданной им в 1909 г.

Тем временем Дрейер приступил к разработке собственной системы управления огнём, в которой расстояние до цели и пеленг отрисовывались на графике в зависимости от времени, чтобы получить скорости их изменения. В сентябре 1910 г. Дрейер запатентовал единую систему управления огнём, а затем его идеи были превращены в рабочие конструкции фирмой Elliott Brothers под руководством Кейта Элфинстоуна. Устройство вошло в историю под названием «столик Дрейера». Первая его версия была испытана на борту додредноутного линкора «Принц Уэльский» (HMS Prince of Wales) в конце 1911 г.

В то же время компания «Арго» заканчивала разработку совершенно нового дизайна циферблата, получившего название Argo Clock Mark IV. Поллен также разработал свой собственный скоростной графопостроитель, который, вместе с новым циферблатом, должен был пройти испытания на сверхдредноуте «Орион» (HMS Orion).

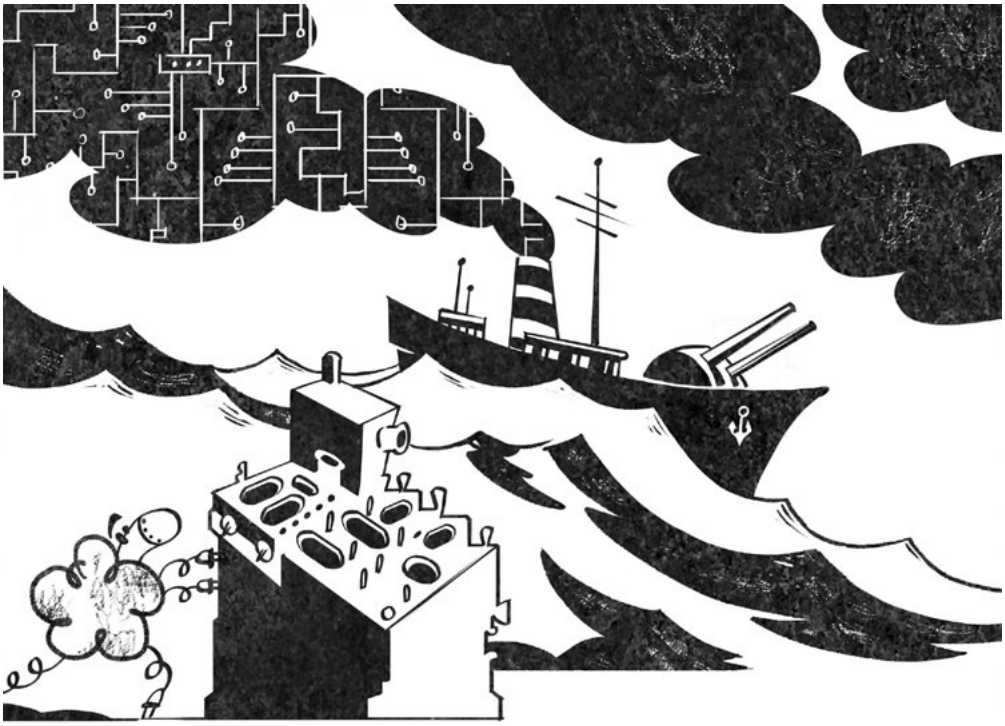
Весной 1912 г. глава DNO контр-адмирал Гордон Мур попросил Поллена назначить цену за поставку дополнительных циферблатов и графопостроителей, однако в итоге договориться не удалось. В августе (после назначения на должность контролёра Флота) Мур рекомендовал не продлевать соглашение о секретности и монополии между Адмиралтейством и компанией «Арго». Последний заказ на пять (позднее — шесть) циферблатов был размещён в октябре, ещё до успешного испытания оборудования на «Орионе», состоявшегося через месяц. Отношения ухудшились ещё больше, и, после того как летом 1913 г. разногласия стали достоянием публики, Адмиралтейство разорвало все связи с Полленом, полностью сфокусировавшись на использовании столиков Дрейера[270]. Впрочем, к началу Первой мировой войны только один 12-дюймовый дредноут Гранд-Флита был оснащён системой Дрейера.

Рис. 37. Сверхдредноут «Орион» (HMS Orion)

Война резко ускорила процесс оснащения кораблей, и к декабрю 1915 г. столиками были оснащены 24 линкора[271]. В большинстве случаев на корабли устанавливались различные варианты столика Дрейера в комбинации с циферблатом Виккерса, и в мае 1916 г. треть линкоров и половина линейных крейсеров использовали именно такие варианты системы[272]. Флот обладал лишь шестью экземплярами циферблатов «Арго», которые в составе столиков Дрейера были установлены на линейный крейсер «Куин Мэри» (HMS Queen Mary) и на линкоры «Конкерор» (HMS Conqueror), «Аякс» (HMS Ajax), «Центурион» (HMS Centurion), а также «Одейшес» (HMS Audacious), погибший 27 октября 1914 г. в результате подрыва на мине. Упомянутый ранее «Орион» был единственным кораблём, полностью оснащённым системой Поллена[273].

Крупнейшим испытанием морской артиллерии времён Первой мировой войны «в реальных условиях» стало Ютландское сражение. Встреча британского Гранд-Флита и германского Hochseeflotte (Флота открытого моря) состоялась 31 мая 1916 г. в Северном море близ датского полуострова Ютландия, в проливе Скагеррак. Несмотря на существенное численное превосходство Гранд-Флита по всем типам кораблей, кроме додредноутов (28 британских линкоров против 16 германских, 9 линейных крейсеров против 5, 8 броненосных крейсеров против 0, 26 лёгких крейсеров против 11, 73 эсминца против 61 и т. д.), тактическую победу одержал германский флот: потери британцев по тоннажу потопленных судов превосходили германские потери почти в два раза (119 980 т против 62 233 т), а по числу погибших — более чем вдвое (5672 человека против 2115). Урон, полученный британским флотом, не был для него катастрофическим и не смог существенно поколебать доминирование Гранд-Флита на море. Однако ощутимые потери вызвали к жизни ожесточённую полемику, отголоски которой не затихают до сих пор.

Одним из наиболее жарких споров стал спор о системах управления огнём. Спустя менее чем два месяца после сражения Поллен опубликовал собственный анализ его результатов на страницах журнала *Land & Water*. В нём он, в частности, писал: *«Никогда ещё потенциальная мощь военно-морских сил не стояла в таком резком контрасте с их реальной эффективностью в бою»*[274]. Под влиянием исследований профессора Джона Сумиды в литературе на долгие годы утвердилась точка зрения о том, что тяжёлые потери в Ютландском сражении были платой за ошибочный выбор, сделанный в пользу системы Дрейера[275]. Профессор Дэвид Минделл в своей книге сообщает о том, что в ходе Ютландского сражения менее 3% снарядов, выпущенных британской артиллерией, достигли цели. Он также указывает на то, что наибольшей точности стрельбы удалось достичь *«единственному кораблю, оснащённому механизированной вычислительной системой»*[276]. Эта поучительная картина могла бы стать прекрасной иллюстрацией торжества передовых вычислительных технологий, однако более тщательное рассмотрение проблемы, к сожалению, ставит под сомнение столь прямолинейную интерпретацию произошедшего. Во-первых, кораблём, название которого опущено в тексте Минделла, являлся линейный крейсер «Куин Мэри», потопленный в первой фазе сражения (так называемом «беге на юг»). Из шести линейных крейсеров под командованием адмирала Битти все, кроме «Куин Мэри», были оснащены столиками Дрейера, и, хотя формально «Куин Мэри» и добился наилучшей точности стрельбы на первой стадии боя, речь идёт всего о четырёх попаданиях[277]. При этом единственным германским большим кораблём, потопленным огнём крупнокалиберной артиллерии, стал линейный крейсер «Лютцов» (SMS Lützow), выведенный из строя орудиями линейного крейсера «Инвинсибл» (HMS Invincible), оснащённого столиком Дрейера[278]. Во-вторых, в первой фазе боя корабли часто меняли курс, что практически сводило на нет преимущества системы Поллена. Плохая видимость в ходе боя ставила под сомнение саму возможность эффективного применения систем



автоматического управления огнём. В пользу этого свидетельствуют рапорты капитанов кораблей, участвовавших в «беге на юг», полученные в ответ на распоряжение Адмиралтейства предоставить графики со столиков Дрейера[279].

В полемике по поводу событий Ютландского сражения и предшествовавшей ему конкуренции Поллена и Дрейера активно участвовали не только непосредственные участники событий, но и их потомки. Свои работы по этому вопросу опубликовали Энтони Поллен, сын Артура Поллена[280], адмирал Дезмонд Дрейер[281], а также внук Джона Джеллико — Николас Джеллико[282]. В числе факторов, повлиявших на исход боя, в разное время назывались недостаточный уровень артиллерийской подготовки команд британских кораблей, недостатки боеприпасов (более ранняя детонация британских снарядов, начинённых кордитом, по сравнению с германскими снарядами на основе тротила), более высокие показатели германских команд в борьбе за живучесть кораблей, ошибки в тактике, допущенные адмиралом Битти, более выгодная позиция германского флота и так далее. При наличии такого множества факторов весьма трудно оценить, действительно ли система Поллена обладала существенными преимуществами по сравнению со столиками Дрейера в реальных боевых условиях.

Однако в конечном счёте история всё же позволила Поллену взять реванш в споре с Дрейером. В августе 1925 г. Королевская комиссия по наградам изобретателям (Royal Commission on Awards to Inventors) постановила выплатить

Поллену сумму в 30 000 фунтов стерлингов в качестве компенсации за плагиат в отношении конструкции циферблата, осуществлённый в 1911 г. Впрочем, современный сравнительный анализ конструкций Поллена и Дрейера не позволяет говорить о заимствовании последним конкретных инженерных решений конкурента, скорее речь может идти об общей концепции элементов устройства[283].

Если не принимать в расчёт улучшения, призванные повысить надёжность устройства при использовании его на корабле, интеграторы систем управления

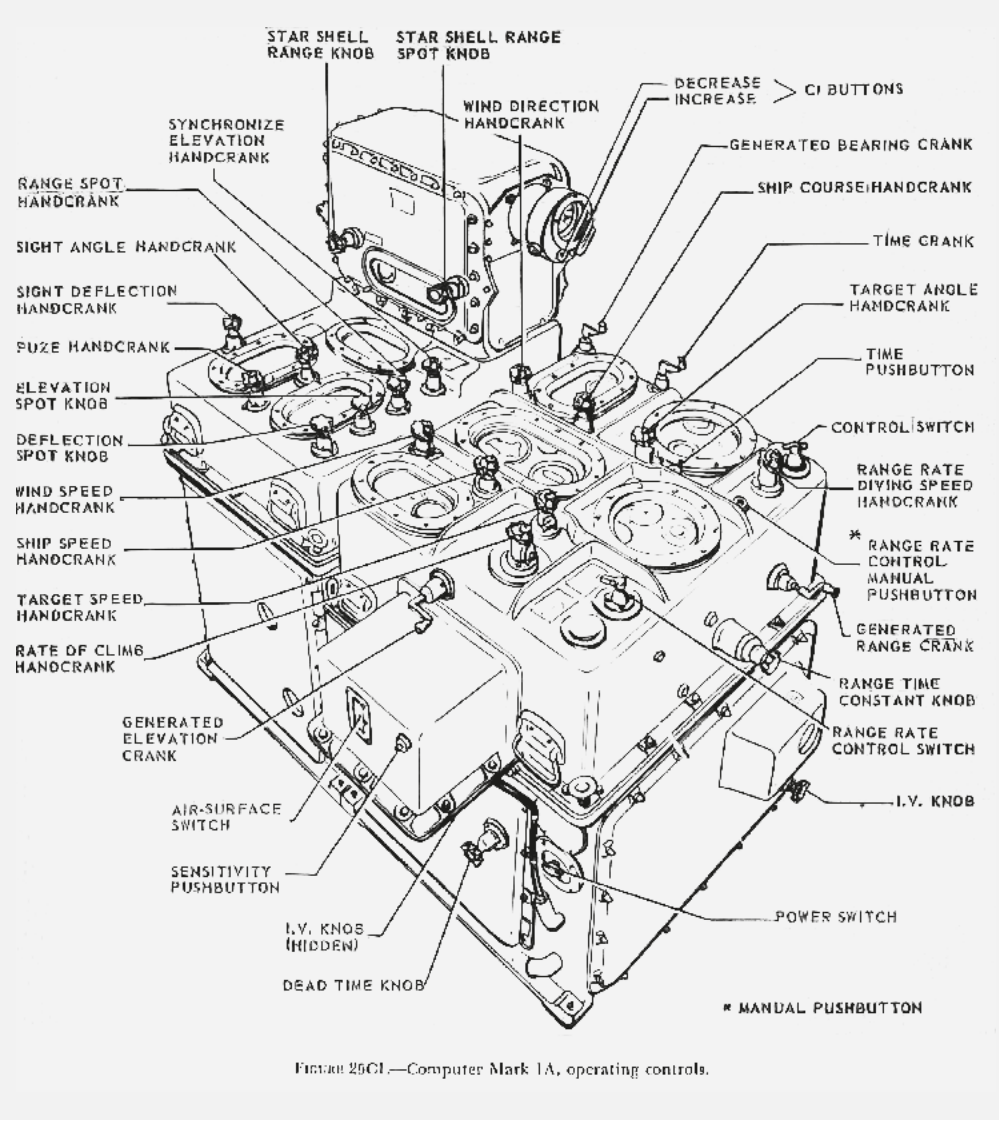


Figure 25CI.—Computer Mark 1A, operating controls.

Рис. 38. Созданный в начале 1930-х гг. компьютер для управления огнём Mark 1A

огнём, использовавшиеся в конце XX в., в основном имели ту же конструкцию, что и устройство Томсона, а сами системы были улучшенными версиями систем Поллена и Дрейера. Ганнибал Форд, создатель компьютера для управления огнём Range Keeper Mark I, улучшил интегратор Томсона, догадавшись использовать пару шариков в каретке для передачи информации о повороте с поворотного диска, но основные принципы конструкции и работы дискового интегратора оставались неизменными.

Системы управления огнём времён Первой мировой войны были в значительной степени представлены автономными устройствами, связанными между собой при помощи голосовых сигналов, передаваемых операторами по телефонным линиям и переговорным трубам корабля. Одними из первых параметров, значение которых стало вводиться в систему автоматически, стали курс корабля — благодаря репитеру (повторителю) гирокомпаса * — и скорость корабля — благодаря механическому лагу. Развитие электрических систем в течение последовавшего за войной десятилетия внесло в эту картину существенные коррективы, не отразившиеся, однако, на самом принципе механических вычислений.

Безраздельная власть механических аналоговых компьютеров в баллистике продолжалась вплоть до 1950-х гг.[284], а последнее боевое применение подобных систем пришлось на войну в Персидском заливе (1991), в которой участвовал линкор «Миссури», оборудованный механической системой управления огнём[285].

* Гирокомпас — механический указатель направления истинного (географического) меридиана, предназначенный для определения курса объекта, а также азимута (пеленга) ориентируемого направления. Принцип действия гирокомпаса основан на использовании свойств гироскопа и суточного вращения Земли. Идея гирокомпаса была предложена французским учёным Жаном Фуко.

2.7 От электромеханических машин к ЭВМ

Прощайте, керосиновые лампы!
Вам электричество пришло на смену.
Уже у театрального подъезда
оно сияло в матовых шарах.

Вера Инбер. *Я вспоминаю*

Как бы совершенны ни были механические вычислительные системы начала XX в., их судьба всё же была предрешена. Прецизионная механика весьма дорогая технология и в наши дни, и, если за вашими вычислительными амбициями не стоит гигантский военный бюджет, приходится довольствоваться довольно скромными возможностями. Механическая система, способная решать крайне узкий спектр вычислительных задач, связанных с управлением артиллерийским огнём, несмотря на весь прогресс в области промышленных технологий, весила в середине XX в. около полутора тонн[286]. В это же время потребность в вычислениях постоянно росла. Конечно, портативные арифмометры при относительно скромных размерах были способны выполнять простые математические операции, однако при выполнении массовых поточных вычислений (например, при решении систем уравнений) приходилось задействовать целые коллективы людей-счётчиков и привлекать сложные организационные технологии в духе «вычислительной фабрики» барона де Прони. Американский физик и популяризатор науки Ричард Фейнман, работавший над созданием ядерной бомбы в рамках Манхэттенского проекта, так описывал вычислительные практики того времени: *«…Проблема, над которой я работал, была вот какой. Нам приходилось делать множество вычислений, и мы делали их на счётных машинах Маршана. Между прочим, это интересно — просто чтобы дать представление, на что был похож Лос-Аламос. У нас были „компьютеры“ Маршана — ручные арифмометры, калькуляторы с числами. Нажимаешь на них, и они умножают, делят, прибавляют и т. д., но не так легко, как это делается сейчас. Это были механические приспособления, часто ломающиеся, их то и дело приходилось отсылать на фабрику для починки. Довольно быстро все оставались без машинок…»*[287]

Рис. 39. Реклама калькулятора Маршана

Конечно, устройства, подобные табулятору Холлерита, позволяли автоматизировать простые табличные вычисления, однако набор выполняемых ими функций был существенно ограниченным. Кстати говоря, табуляторы стали одним из первых видов вычислительных машин, задействующих в своей работе электричество, причём не только в качестве привода, но и в процессе чтения данных и выполнения счётных операций (подробнее об этом говорилось выше, в главе 2.5 «Табулятор Холлерита»).

Неудивительно, что в период между двумя мировыми войнами сразу несколько групп инженеров и учёных задались вопросом создания высокопроизводительных универсальных вычислительных машин, что привело к последующим спорам о приоритете и патентным войнам в послевоенный период.

2.7.1 Конрад Цузе, создатель первого компьютера Z1

Интересно, что первым человеком, которому суждено было воплотить в жизнь мечты Чарльза Бэббиджа об аналитической машине, стал сын простого прусского гражданского служащего[288] Конрад Цузе. В эпоху бурного технического прогресса у человечества ушло около 100 лет на воплощение в жизнь весьма детально проработанной концепции. В 1912 г. семья Цузе переехала из Берлина в Браунсберг, сонный маленький городок в восточной Пруссии (сейчас Бранево, Польша)[289]. Отец Конрада Эмиль Цузе получил административную должность в местном почтовом отделении, и его семья поселилась в здании почты, расположенном напротив городской ратуши[290]. С самого раннего детства Конрад начал проявлять огромный талант, но не в области математики или техники, как можно было бы предположить, а в изобразительном искусстве[291]. Как вспоминал позже сам Цузе, его школьная книга по латыни была разукрашена изображениями железнодорожных локомотивов и тщательно выполненными рисунками берлинских городских поездов[292]. Рано пойдя учиться, первые девять лет Конрад посещал католическую гимназию Браунсбергской иезуитской коллегии (Lyceum

2.7.1

Конрад Цузе, создатель первого компьютера Z1

Hosianum). Заканчивал же школьное обучение он уже в реформированной реальной гимназии города Хойерсверда в Саксонии, куда позже переехала его семья. После окончания учёбы молодой Конрад становится перед выбором, чему учиться дальше — технике или живописи. Фильм Фрица Ланга «Метрополис» 1927 г. произвёл сильное впечатление на Конрада[293]. Он мечтал спроектировать и построить гигантский футуристический город, подобный Метрополису, и даже разработал план такого города, рассчитанного на 35 млн жителей, в рамках школьного проекта[294]. Следуя своему увлечению, Конрад поступил в Техническую высшую школу Берлин-Шарлоттенбурга (Technischen Hochschule Berlin-Charlottenburg, сейчас — Берлинский технический университет), где стал изучать машиностроение, архитектуру, а затем — гражданское строительство.

Во время учёбы он также работал художником по рекламе, каменщиком и мостостроителем. Как раз тогда в Берлине появились первые светофоры, что привело поначалу к возникновению больших пробок. Цузе был одним из первых, кто пытался создать нечто вроде «зелёной волны», однако потерпел неудачу. Ещё Конрад увлекался фотографией и разработал автоматизированные системы проявки плёночных негативов, управляемые при помощи перфокарт. Позже он создал специальную систему для кинопроекции, получившую название Elliptisches Kino.

Следующей идеей юного мечтателя стало завоевание космоса. В его грёзах человечество должно было основать на спутниках внешних планет Солнечной системы базы, построить там парк ракет, вмещающих по сто-двести пассажиров, и отправить их со скоростью в одну тысячную световой к ближайшей звезде — в полёт продолжительностью 4000 лет.

Город будущего, автоматическая фотолаборатория, эллиптический кинотеатр, космический проект — всё это лишь малая часть технических идей, предшествовавших созданию компьютера[295]. В ходе тренировки в военном лагере в студенческие годы Цузе впервые столкнулся с механическим баллистическим вычислителем, использовавшимся в зенитной артиллерии, и последний, «благодаря множеству цилиндров, шпинделей и зубчатых колёс», произвёл на Конрада огромное впечатление[296].

Изучая гражданское строительство, в частности сооружение зданий и дорог, Цузе столкнулся с проблемой: расчёты конструкций требовали решения огромных систем линейных уравнений, но заниматься этим с помощью логарифмической линейки или механического калькулятора того времени было очень непросто. Позже он вспоминал: *«Я был студентом-строителем в Берлине. Берлин — хороший город, и у студента было много возможностей приятно провести время, например с милыми девушками. Но вместо этого нам приходилось выполнять громоздкие и ужасные вычисления»*.

Приблизительно в 1934 г. молодой Куно (так Конрада называли друзья — от псевдонима Kuno See, которым он подписывал картины) начал думать о вычислительных машинах. В 1935-м, после окончания Технической школы, он пошёл было работать инженером-конструктором на авиационный завод

Хеншеля (Henschel Flugzeugwerke), но уже через год уволился, решив полностью посвятить себя созданию компьютера.

В родительской квартире он оборудовал мастерскую. Помогали ему не только отец и мать, уступившие под эту затею самую большую комнату и даже давшие немного денег (хотя и были небогаты), но также сестра Лизелотта и несколько сокурсников и друзей. В итоге Цузе удалось собрать на материалы для будущей машины несколько тысяч марок.

Но друзья помогали ему не только деньгами, некоторые из них — и непосредственно в мастерской. Наиболее изобретательным помощником Конрада стал его товарищ по студенческому братству и близкий друг Хельмут Шрайер, который позже сыграет важную роль в создании компьютеров Цузе.

В 1936 г. Цузе завершил разработку архитектуры своего первого компьютера, V1 (V — сокращение от Versuchsmodell, «экспериментальная модель»; на самом деле все первые компьютеры Цузе назывались на букву V (от V1 до V4), но после Второй мировой войны он изменил их названия на Z1—Z4, чтобы избежать неприятной ассоциации с военными ракетами «Фау»). Его изготовление началось в том же году, и в 1938 г. был готов опытный образец.

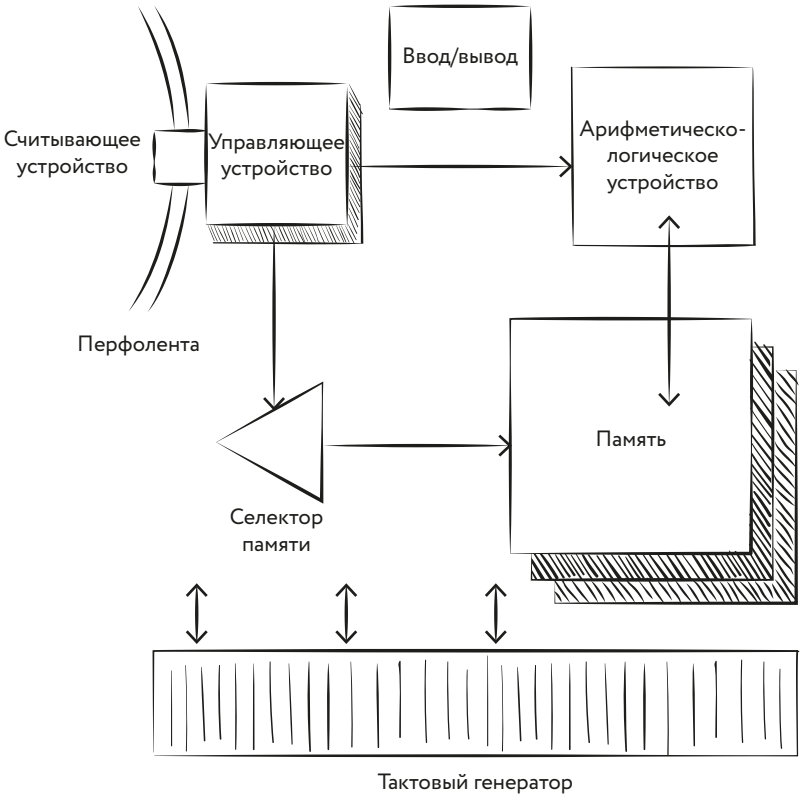


Рис. 40. Архитектура компьютера Z1

2.7.1

Конрад Цузе, создатель первого компьютера Z1

При весе около тонны Z1 состоял из примерно 20 000 деталей. Это был программируемый компьютер, основанный на двоичной логике и способный оперировать двоичными представлениями чисел с плавающей запятой. Он состоял полностью из тонких металлических пластин, которые Куно и его друзья изготовили с помощью лобзика. Единственным электрическим блоком был двигатель мощностью 1 кВт, обеспечивавший машине тактовую частоту в один герц (один оборот в секунду). Также машина имела ручной привод. Z1 состоял из шести основных блоков: блока управления, счётного устройства, системы ввода-вывода (клавиатуры и табло), блока памяти (способного хранить 64 числа, на каждое из которых отводилось по 22 бита — 14 бит для хранения мантиссы и 8 бит для хранения порядка и знака числа), селектора памяти и устройства для чтения перфолент, позволявших считывать программы (Цузе называл их «расчётными планами» — Rechenplans), команды которых кодировались при помощи 8-битного кода[297].

Когда в 1936 г. Конрад пригласил своего друга Гельмута Шрайера приехать и посмотреть на его машину, Гельмут, впервые увидев эту странную металлическую штуковину, внезапно сказал: *«Ты должен сделать это на основе вакуумных ламп»*. Первая реакция Куно была отрицательной: *«Это ещё одна из бредовых идей (Schnapsidee) моего друга!»* Из вакуумных ламп можно создавать радиооборудование, но счётные машины?..

Цузе и Шрайер продолжали работать вместе над механическими моделями, но идея с вакуумными лампами не была забыта. Шрайер написал диссертацию на эту тему в Институте исследования колебаний Берлинского технического университета под руководством профессора Вильгельма Штеблейна[298] и создал несколько логических схем на основе ламп[299]. Время отклика лампы на несколько порядков меньше, чем у реле, что позволило бы осуществлять от 5000 до 10 000 операций в секунду, в результате чего скорость вычислений компьютера увеличилась бы в тысячу раз[300]. В 1938 г. Цузе и Шрайер продемонстрировали электронные схемы нескольким немецким учёным и даже раскрыли идею создания электронного компьютера, но, когда они упомянули, что для такого устройства потребуется около 2000 вакуумных ламп и несколько тысяч ламп накаливания, их идею отнесли к разряду фантастики. Крупнейшие электронные устройства того времени состояли из нескольких сотен ламп. Позже Шрайер предложит создать электронный компьютер на основе примерно 2000 ламп для нужд военно-воздушных сил, однако, когда он сообщил, что для производства машины понадобится около двух лет, в ответ последовало: *«Мы выиграем войну задолго до того, как ваш компьютер будет готов, стоит ли утруждать себя?»*[301]

Цузе продолжил работу над механическими устройствами — вплоть до конца 1940-х гг. он всё ещё надеялся, что прогресс в производственной сфере позволит механической памяти успешно конкурировать с памятью, основанной на электронных лампах[302]. Однако по результатам опытов с Z1 Цузе был крайне недоволен надёжностью двоичных переключателей Z1, основанных на металлических пластинах. Больше всего проблем они доставляли

в счётном устройстве. Конрад был знаком с реле, используемыми в телефонии, но ещё лучше в них разбирался Шрайер, поскольку имел большой опыт работы с ними в качестве специалиста по телекоммуникациям. Друзья произвели предварительные расчёты и пришли к выводу, что для компьютера, полностью основанного на реле, их потребуется несколько тысяч штук и конструкция получится слишком громоздкой. Кроме того, реле были слишком дорогими для проекта с весьма малым финансированием. Поэтому конструкция второго компьютера Цузе, Z2, предполагала замену пластин на реле только в счётном устройстве. Конструктору удалось раздобыть 800 старых телефонных реле и с помощью друзей приспособить их для своей цели. Эти старые реле станут причиной многих проблем с надёжностью в дальнейшем.

В поисках источников финансирования в 1937 г. Цузе связался с бывшим производителем механических калькуляторов — Куртом Паннке. Началось общение неудачно: доктор Паннке ответил Цузе, что *«в области вычислительных машин практически всё, включая новейшие возможные подходы и сложные устройства, уже изобретено»*. Тем не менее доктор Паннке согласился посетить мастерскую Цузе и по итогам был настолько впечатлён его работой, что решил выделить 7000 рейхсмарок — это позволило продолжить работу.

Производство Z2 началось в 1938 г., и в следующем году опытный образец был готов. Основными отличиями Z2 от его предшественника стали увеличение тактовой частоты до 3 Гц, переход к использованию 36-миллиметровой перфорированной киноплёнки вместо бумажных перфолент, уменьшение объёма памяти (теперь она состояла из 16 ячеек по 16 бит каждая) и новое счётное устройство на основе телефонных реле, способное выполнять операции с 16-битными числами с плавающей запятой.

Помимо инженерных работ, Цузе занимался разработкой теоретической базы для своих компьютеров. Он был знаком с двоичной системой счисления по работам Лейбница, но ничего не знал о Джордже Буле и его алгебре. Ему пришлось изучить не только работы Буля, но также и математическую логику Гильберта, Фреге, Шрёдера и других логиков. К сожалению, он обошёл стороной работы Бэббиджа и его «механическую нотацию»[303]. В наши дни кажется удивительным, что ни Цузе, ни многие другие пионеры вычислительной техники не были знакомы с работами Бэббиджа. Впервые Цузе, по собственному признанию, услышал о них от эксперта американского патентного бюро спустя много лет после создания своих первых компьютеров[304]. Итогом работ немецкого изобретателя стало создание собственной системы, альтернативной нотации Бэббиджа, которую сам Цузе назвал «условной комбинаторикой» (Bedingungskombinatorik).

В 1940 г. Z2 был успешно продемонстрирован специалистам Немецкой лаборатории авиации (Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt, DVL)[305]. Надо сказать, что Цузе несказанно повезло: Z2 был крайне ненадёжной в эксплуатации машиной и за несколько часов до визита профессора Тейхмана из DVL

2.7.1

Конрад Цузе, создатель первого компьютера Z1

изобретатель тщетно пытался заставить его функционировать. Однако, как писал Цузе в воспоминаниях, в этот раз сработал «обратный эффект присутствия» и во время демонстрации компьютер работал безупречно[306]. В результате Цузе получил частичное финансирование разработки своего третьего компьютера, Z3, начавшейся чуть раньше, в 1939 г.

Весной 1941 г. Z3 был готов, а в мае 1941 г. — представлен учёным в Берлине. Новый компьютер полностью был основан на реле (600 реле для счётного устройства, 1400 — для памяти и 400 — для блока управления). Во всех других аспектах он походил на Z1 и Z2: так же как и предыдущие модели, Z3 использовал двоичную систему счисления и числа с плавающей запятой, счётное устройство с двумя 22-битными регистрами, ёмкость памяти составляла 64 слова по 22 бита, управление обеспечивалось посредством ленты с восьмью дорожками (т. е. команда состояла из 8 бит). Ввод данных осуществлялся при помощи специальной клавиатуры, вывод — при помощи лампочек, подсвечивающих цифры и позицию десятичного разделителя на табло. Машина стала ещё немного быстрее, её тактовая частота возросла до 5,33 Гц. Кроме того, сам принцип работы стал совершеннее — появились элементы параллелизма: 22-битное слово могло быть перемещено из памяти в регистр R1 и обратно за один такт, а счётное устройство обзавелось параллельными сумматорами и теперь, помимо вычитания, сложения, умножения и деления, было способно извлекать квадратные корни.

После завершения работ над Z3 Цузе получил заказ от своего первого заказчика — авиастроительной компании «Хеншель» (Henschel) — на разработку специализированного компьютера для контроля качества изготовления крыльев и хвостового оперения управляемых авиационных бомб.

С этой целью элементы оперения подвергались детальным обмерам при помощи датчиков (измерительных головок), расположенных примерно в 80 точках. Затем надо было рассчитать необходимые поправки. Для выполнения этого расчёта Цузе разработал машину S1, состоявшую из около 500 реле. Эта машина заменила дюжину калькуляторов и безотказно работала в течение двух лет, обслуживая две смены в день. Существовавшая процедура требовала ручного ввода показаний датчиков в компьютер. Это подвигло Цузе на создание улучшенной модели, которая могла бы автоматически считывать показания датчиков. Сердцем новой машины, получившей название S2, было устройство, которое сегодня называют аналогово-цифровым преобразователем.

S2, запущенная в эксплуатацию в 1944 г. и состоявшая из приблизительно 800 реле и сотни измерительных головок, стала, по всей видимости, первым промышленным компьютером в мире[307].

В 1942 г., одновременно с работой над S1, Цузе начал разработку своего следующего компьютера — Z4, который должен был стать прототипом серийной модели. Однако нехватка материалов и тяжёлая обстановка в конце войны поставили крест на планах. Машины Z3 и S1 были уничтожены в 1944 г. в ходе бомбардировок Берлина, судьба S2 точно не известна: Цузе бросил

работающую машину на заводе в предместьях Берлина, и, по его мнению, она с большой вероятностью попала в руки советских войск. В марте 1945 г. Цузе со своей беременной женой Гизелой и незавершённым Z4 бежал из Берлина в городок Хинтерштайн в Баварии, где спрятал компьютер в погребе. Он отчаянно хотел возобновить работу над Z4, но на первое место выдвинулась необходимость выживания. Чтобы заработать на пропитание, Цузе занимался изготовлением ксилографий (гравюр на дереве) и продавал их фермерам и американским военным. Завершить работу над компьютером удалось лишь спустя три года. В 1949 г. Цузе связался с профессором Эдуардом Штифелем из ETH-Zürich (Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich), который по результатам осмотра машины нашёл её пригодной для научных расчётов. Несмотря на немного старомодную технологию Z4 (в то же время в США разрабатываются электронные компьютеры), Штифель был впечатлён простотой программирования и мощным счётным устройством. Воодушевлённый этим, Цузе основал собственную компанию Zuse KG и начал создавать улучшенную версию Z4 для ETH-Zürich, добавив возможность условного перехода, инструкции для печати результатов на пишущей машинке, вывода данных на перфокарты и перфоленту и другие. Восстановление Z4 стоило Цузе около 60 000 немецких марок. ETH-Zürich заплатил сумму около 100 000 немецких марок (среднемесячный доход в это время составлял около 180 немецких марок в месяц). Z4 стал большим успехом как для ETH, так и для Zuse KG.

С 1949 по 1969 г. компания Zuse KG продала около 250 компьютеров на сумму около 100 млн немецких марок. К сожалению, после финансовых трудностей Цузе был вынужден продать бизнес (который в итоге достался группе Siemens) и прекратить предпринимательскую деятельность[308].

Конрад Цузе прожил долгую жизнь и умер 18 декабря 1995 г. в Хюнфельде (Германия). Он успел создать множество новых вычислительных машин, разработал первый в мире язык программирования Plankalkül (дословно «исчисление планов»)[309], пережил финансовые трудности и продажу своей фирмы Zuse KG компании Siemens[310]. В 1969 г. Цузе издал книгу «Вычислительное пространство» (Rechnender Raum), выдвинув идеи «цифровой физики»[311]. Он предположил, что наблюдаемая нами Вселенная является продуктом вычислений клеточного автомата или другого дискретного вычислительного устройства[312].

В рамках концепции «эквивалентной экономики» Цузе совместно с Арно Петерсом работал над созданием проекта высокотехнологичной плановой экономики, базирующейся на управлении мощными современными компьютерами. В процессе разработки этого концепта Цузе ввёл термин «компьютерный социализм». Результатом их совместной работы стала книга «Компьютерный социализм. Беседы с Конрадом Цузе» (Was ist und wie verwirklicht sich Computer-Sozialismus: Gespräche mit Konrad Zuse), опубликованная Арно Петерсом уже после смерти Цузе, в 2000 г.[313]

Говард Эйкен и компьютер Mark I 2.7.2

Идея создания электромеханической вычислительной машины пробивала себе дорогу и по другую сторону Атлантики. Примерно в то же время, когда Цузе трудился над первой моделью своей машины, уже упоминавшийся нами гарвардский физик Говард Эйкен обратился к идее автоматизации вычислений. Диссертационная работа Эйкена была основана во многом на решении нелинейных дифференциальных уравнений, что требовало выполнения утомительных расчётов. Эйкен прекрасно понимал, что подобная работа может быть механизирована и что вычислительная машина могла бы принести пользу при решении разнообразных задач во многих областях науки. Эйкен понимал, что для создания компьютера потребуется много денег, и решил обратиться к одному из крупнейших производителей механических и электромеханических калькуляторов в США — компании «Монро» (Monroe Calculating Machine Company). 22 апреля 1937 г. Эйкен представил главному инженеру «Монро» Джорджу Чейзу свои планы по созданию системы для автоматических вычислений. Система должна была уметь выполнять четыре основные арифметические операции, осуществлять расчёты по заданной последовательности действий, хранить в памяти введённые и вычисленные значения, менять последовательность вычислений в зависимости от промежуточных результатов, а также сохранять результаты расчётов[314]. Чейзу понравился данный проект, он решил, что создание подобной машины и полностью окупит требуемые инвестиции, и может стать ключевым для бизнеса компании. Однако, несмотря на несколько месяцев обсуждений, Чейзу так и не удалось убедить руководство компании одобрить проект.

Примечательно, что Эйкен был учеником Эмори Чаффи, специалиста по электронным лампам, и, следовательно, прекрасно знал о возможностях этой технологии. Так почему же свой компьютер Эйкен хотел создать на базе реле? Ответ: по чисто финансовым соображениям. Эйкен знал, что проект потребует существенных вложений. Когда он подал заявку в «Монро», то был готов сделать свой компьютер из механических частей и реле. Если бы интерес к проекту Эйкена проявила компания, специализирующаяся на электровакуумных приборах, то проектируемая машина могла бы стать электронной. Забегая вперёд, скажем, что в итоге машина была создана из элементов табуляторов — потому что проект осуществляла IBM.

Несмотря на то что отказ «Монро», безусловно, стал для Эйкена ударом, он не собирался сдаваться быстро. Хотя Чейз и не смог убедить руководство своей компании, он предложил Эйкену обратиться за помощью к гарвардскому профессору Теодору Брауну, другу президента IBM Томаса Уотсона — старшего. Браун, в свою очередь, попросил изучить проект Эйкена старшего инженера IBM Джеймса Брайса. После положительного заключения Брайса и поддержки Уотсона компания IBM одобрила проект по постройке машины, получившей впоследствии название Harvard Mark I[315].

В конце 1937 — начале 1938 г. Эйкен подготовил формальное описание проекта под названием «Предлагаемая автоматическая вычислительная машина» (Proposed Automatic Calculating Machine). Оно состояло из 22 печатных страниц с двойным интервалом и начиналось с краткой истории устройств, предназначенных для автоматизации вычислений. Эйкен упоминает неперовы палочки, калькуляторы Паскаля, Морланда и Лейбница, дифференциальные машины Бэббиджа, Шутца, Вайберга и Гранта, ткацкий станок Жаккара и, наконец, табулятор Холлерита[316].

Затем Эйкен обращается к необходимости более мощных инструментов для проведения расчётов в математических и физических дисциплинах, в общих чертах он обрисовывает области применения своего компьютера — это и теоретическая физика, радиосвязь и телевидение, астрономия, а также быстроразвивающаяся сфера математической экономики и социологии. Эйкен выделил четыре конструктивные особенности, которые должны, по его мнению, отличать машину для научных вычислений от производимых IBM табуляторов.

1. Машина должна быть способна обрабатывать как положительные, так и отрицательные величины, в то время как существовавшие тогда учётные машины были предназначены лишь для решения задач с положительными числами.
2. Машина должна поддерживать многие виды трансцендентных функций (например, тригонометрические), эллиптические функции, функции Бесселя и вероятностные функции.
3. После задания процесса вычислений работа машины должна быть полностью автоматической.
4. Машина должна быть способна не только вычислять сводные значения для столбцов таблиц, но и осуществлять вычисления в их строках.

Переговоры официальных представителей IBM и Гарварда завершились 31 марта 1939 г. подписанием соглашения, в соответствии с которым IBM согласилась построить для Гарварда вычислительную систему, состоящую из машин для автоматического выполнения серий математических вычислений. Устройство получило название ASCC (Automatic Sequence Controlled Calculator, автоматический калькулятор с последовательным управлением), позже стало использоваться название Harvard Mark I. Работа над постройкой машины началась в мае 1939 г. в лабораториях IBM в городе Эндикотте (штат Нью-Йорк), и предполагалось, что она продлится два года. В действительности на постройку ушло почти пять лет. В январе 1943 г. машина решила свою первую вычислительную задачу, а в феврале 1944-го была перевезена в Гарвард и установлена в подвале Лаборатории физических исследований. Сборка машины на новом месте завершилась в марте 1944 г. В августе того же года IBM официально представила машину университету. Общие затраты IBM на создание этой машины обычно оцениваются в 200 000 долларов — весьма внушительная сумма для того времени.

В мае 1944 г. машина на время войны была передана в ведение Бюро кораблестроения (Bureau of Ships) военно-морского флота. К августу команда, работавшая на Марк I под руководством Эйкена, была полностью укомплектована многочисленным штатом специалистов военно-морского флота, включающим ряд офицеров, среди которых были Грейс Хоппер и Ричард Блох, ставшие главными программистами. Считается, что именно Грейс Хоппер нашла первый компьютерный «баг» (bug, «жучок») — мёртвую моль, которая попала в Mark I и своими крыльями заблокировала чтение отверстий перфоленты[317]. Хотя на самом деле слово «баг» использовалось для описания дефекта, по крайней мере с 1878 г. (в 1878 г. Томас Эдисон писал в письме Тивадару Пушкашу: *«Так было со всеми моими изобретениями. Первый шаг — интуиция, которая приходит как вспышка, затем возникают трудности — устройство отказывается работать, и именно тогда проявляются „жучки“ — как называют эти мелкие ошибки и трудности, — и требуются месяцы пристального наблюдения, исследований и усилий, прежде чем дело дойдёт до коммерческого успеха или неудачи»*[318]), но Грейс Хоппер приписывают изобретение слова «отладка» (debugging, дословно «обезжучивание») для обозначения работы по устранению ошибок в программах.

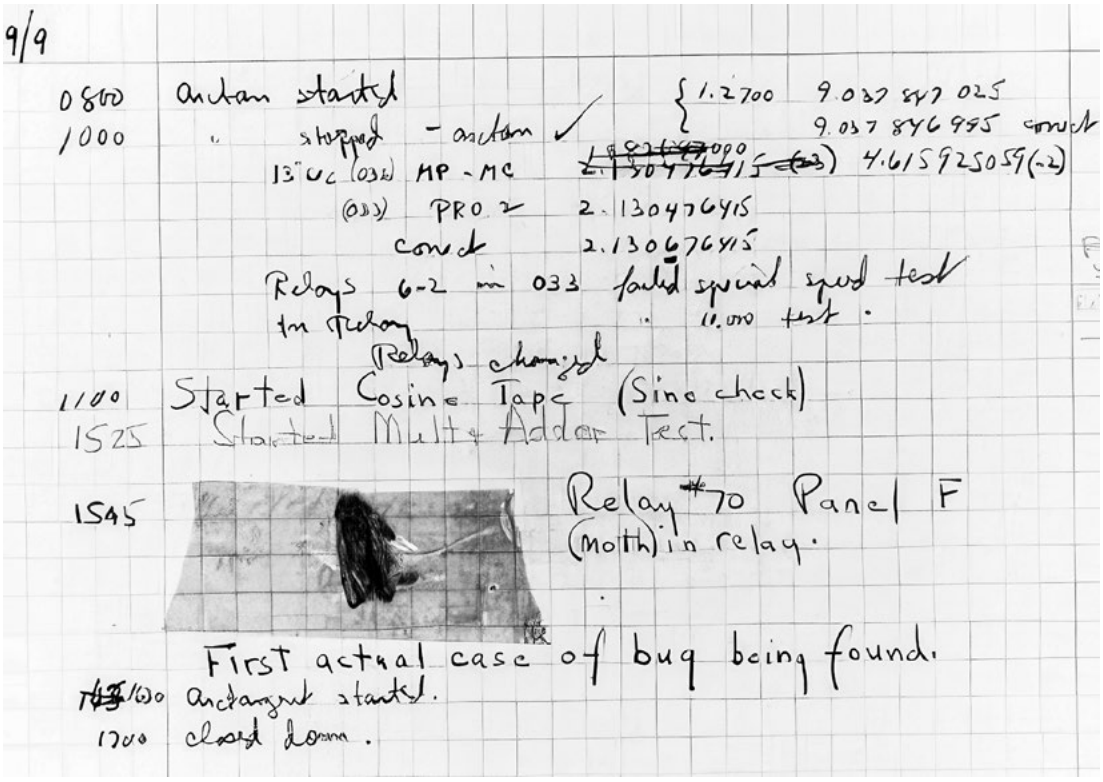


Рис. 41. Компьютерный «баг», по одной из версий найденный Грейс Хоппер

В 1944 и 1945 гг. машина работала практически непрерывно. Задачи военного времени, которые нужно было решить, включали исследования магнитных полей, связанных с защитой кораблей от магнитных мин, а также математические расчёты по проектированию и использованию радаров. Без сомнения, самой важной проблемой военного времени были расчёты для взрывов, заказанные Джоном фон Нейманом для лаборатории в Лос-Аламосе. Прошло не меньше года, прежде чем сотрудники Эйкена узнали, что эти расчёты были необходимы для создания атомной бомбы. Выдающийся успех и одновременно с этим тот факт, что расчёты взрывов потребовали больше времени, чем предполагалось по плану, привели к тому, что военно-морской флот попросил Эйкена в начале 1945 г. спроектировать и построить вторую аналогичную машину. Она получила название Mark II.

Внешне вычислительная машина представляла собой внушительное зрелище: при размерах приблизительно 16 × 2,5 × 1 м она весила пять тонн и содержала 760 000 деталей, 850 км проводов, 3 000 000 соединений, 3500 многократных реле с 35 000 контактов, 2225 счётчиков, 1484 десятипозиционных переключателя. Опираясь на технологию, разработанную IBM для статистических и бухгалтерских машин, Harvard Mark I задействовала в своей конструкции традиционные компоненты IBM, такие как электромагнитные

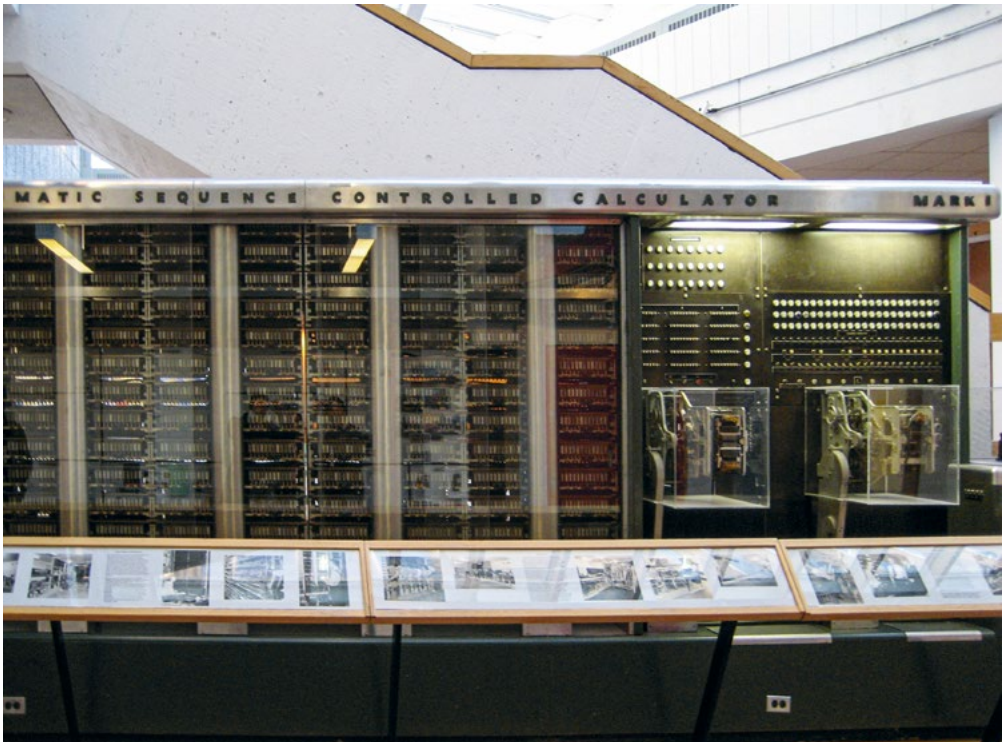


Рис. 42. Вычислительная машина Harvard Mark I

реле, счётчики, кулачковые контакты, перфокарты и электрические пишущие машинки, но, кроме этого, также включала новые конструктивные элементы — реле и новые, более быстрые и компактные виды счётчиков, которые раньше не использовались в машинах IBM.

Машина приводилась в действие длинным горизонтальным валом, непрерывно вращающимся со скоростью около 3 оборотов в секунду. Счётное устройство и память Mark I оперировали 23-значными десятичными числами (24-я позиция была отведена для хранения знака). Расчёты производились в десятичных числах с фиксированной запятой. Эйкен говорил, что причиной выбора 23-значных чисел было то, что он намеревался пересчитать планетные орбиты, а для этого нужна была именно такая точность[319].

Машина была снабжена 60 наборами из 24 переключателей для ручного ввода данных и была способна хранить в памяти 72 числа[320]. Она выполняла три сложения или вычитания в секунду, умножение занимало 6 секунд, деление — 15,3 секунды, а на вычисление логарифма или тригонометрической функции уходило более одной минуты[321].

Кто же был первым? 2.7.3

В чём заключался принципиальный прогресс, достигнутый Цузе и Эйкеном? Ответ на этот вопрос не столь очевиден. Ни машины Цузе, ни Harvard Mark I не были первыми в истории электромеханическими счётными устройствами. Мы знаем, что табулятор Холлерита использовал в своей работе электрический ток. Механические счётные машины — арифмометры — в 1930-е гг. были распространены повсеместно, неужели замена ручного привода арифмометра на электрический двигатель стала столь грандиозной инновацией? Да, машины Эйкена и Цузе могли осуществлять цепочки последовательных действий, но ведь и табуляторы выполняли операции последовательного сложения при подсчёте перфокарт. Конечно, им были недоступны более сложные операции, такие как вычисление тригонометрических функций, но действительно ли революционным стало добавление вычитания, умножения и деления к сложению, доступному табуляторам?

Для того чтобы объяснить принципиальную суть инноваций Цузе и Эйкена, нам придётся сделать небольшое теоретическое отступление.

Несколько лет назад пользователь Reddit с ником u/General_Urist написал пост со вполне резонным вопросом: *«Я видел множество приспособлений, номинированных на звание первого в мире компьютера. Разностная машина, Z1 Цузе, Z3 Цузе, Colossus, ENIAC и так далее. Почему по этому поводу существуют разногласия?»* В комментариях другие пользователи вполне резонно отвечают: *«Потому что люди не могут договориться о том, что такое „компьютер“»*. Пользователь BitOBear приводит длинный список спорных признаков «компьютера», например: тьюринг-полнота [Turing completeness],

наличие или отсутствие движущихся частей (или ограничение их количества), допускает ли устройство перепрограммирование и возможно ли это перепрограммирование программными средствами, должна ли у устройства быть память и считаются ли за память перфокарты или углы поворота зубчатых колёс и так далее[322].

Отметив имеющиеся разногласия, хотелось бы остановиться на первом из названных признаков — так называемой тьюринг-полноте устройства. Вплоть до 1940-х гг. слово «компьютер» (computer) зачастую обозначало человека. Историк вычислительной техники Пол Черуцци в своей статье с говорящим названием «Когда компьютерами были люди» (When Computers Were Human)[323] приводит любопытную выдержку из отчёта, написанного в феврале 1945 г. одним из пионеров вычислительной техники Джорджем Штибицем: *«Под „калькулятором“ или „счётной машиной“ мы будем понимать устройство… способное принимать [на вход] два числа A и B и формировать несколько или любую из комбинаций A + B, A – B, A × B, A / B. Под „компьютером“ мы будем понимать машину, способную автоматически выполнять последовательность операций такого рода и сохранять необходимые промежуточные результаты. Задействованные в процессах люди будут называться „операторами“, чтобы отличать их от „компьютеров“ (машин)».* Под определение Штибица подходят первые машины Цузе и Mark I Эйкена, но не подходят ни табулятор Холлерита, ни разностные машины, ни ранние механические калькуляторы. Понятно, что с определением Штибица можно спорить, говорить, что оно выбрано произвольно, но самое примечательное в нём то, что его появление знаменует собой признание за машиной наличия способности заменить человека в деле решения нетривиальных вычислительных задач, отличных от простых арифметических примеров, решаемых в одно действие. Но какими свойствами должна обладать машина, способная, руководствуясь соответствующей программой, решить любую математическую задачу из числа тех, которые способен решить человек, снабжённый неограниченным количеством карандашей и бумаги?

2.7.4 Теоретики — Гёдель, Чёрч, Тьюринг

Такой простой, на первый взгляд, вопрос требует для ответа на него весьма нетривиальных теоретических изысканий. Интересно, что вплоть до 1930-х гг., несмотря на, казалось бы, самоочевидность самого явления, у учёных не было формального определения для множества задач, которые могут быть решены при помощи бумажно-карандашных методов. Хотя для их обозначения имелся даже специальный, хотя и неформальный термин: «эффективно вычислимые задачи» (effectively calculable problems). В 1930-е гг. сразу несколько учёных попытались дать формальные определения этому понятию и подошли к проблеме, как часто водится, с разных сторон.

Из английской «Википедии» можно узнать, что в 1933 г. австро-американский математик Курт Гёдель вместе с Жаком Эрбраном дали формальное определение класса, подходящего в качестве аналога понятия «эффективно вычислимая задача». Этот класс был назван «общерекурсивными функциями» (general recursive functions). Класс общерекурсивных функций — это наименьший класс функций (с одним или более аргументом), он включает в себя все постоянные функции, проекцию, функцию следования и замкнутый относительно функций подстановки, примитивной рекурсии и минимизации[324].

У внимательного читателя после прочтения предыдущего абзаца наверняка возникнет как минимум два вопроса. Во-первых, что означает «австро-американский математик» — неужели на момент публикации статьи, содержавшей определение, у Гёделя было двойное гражданство? Во-вторых, что ещё более странно, как Жак Эрбран, умерший в 1931 г., смог в 1933 г. опубликовать вместе с Гёделем важный научный результат?

За скупыми строками онлайн-энциклопедии, на первый взгляд сквозящими некоторой небрежностью, скрываются удивительные и трагические подробности жизни людей, ставших первопроходцами на неизведанных ранее тропах новой математики.

Жизнь Жака Эрбрана прервалась в 23 года в результате несчастного случая — молодой человек сорвался со скалы массива Экрен во Французских Альпах. Несмотря на возраст, Эрбран успел заслужить в глазах своих учителей звание «одного из величайших математиков нового поколения». Эссе Эрбрана «О непротиворечивости арифметики» (On the Consistency of Arithmetic), подписанное датой 14 июля 1931 г., было направлено автором для публикации в престижный немецкий «Журнал по чистой и прикладной математике» (Journal für die reine und angewandte Mathematik, часто его кратко называют «Журналом Крелле» по фамилии основателя) непосредственно перед отъездом на отдых в Альпы и получено журналом в день гибели математика, 27 июля. В процессе работы над эссе в начале 1931 г. Эрбран прочитал знаменитую статью Гёделя «О формально неразрешимых предложениях Principia Mathematica и родственных систем» (Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme), в которой Гёдель впервые сформулировал свои знаменитые теоремы о неполноте. По достоинству оценив результат, полученный Гёделем, Эрбран посвятил последний раздел своего эссе доказательству того, что положения его работы не противоречат выводам коллеги. В своём письме Гёделю, написанному в процессе работы над эссе, Эрбран сформулировал понятие рекурсивной функции, которое Гёдель впоследствии подверг обобщению, сославшись при этом на автора. Таким образом на свет появилось определение класса общерекурсивных функций[325].

Курт Гёдель родился 28 апреля 1906 г. в Австро-Венгрии, в городе Брюнне (сейчас — Брно в Чехии)[326]. В 1918 г., после распада империи, юноша получил чехословацкое гражданство, однако в 23 года официально перешёл в австрийское[327]. Стоило Курту промедлить несколько лет, и тогда авторам

«Википедии» пришлось бы, вероятно, писать уже о чехословацко-австрийско-американском математике.

В 18 лет, по стопам старшего брата, Гёдель отправляется в Вену, где поступает в университет, а в 23 года защищает диссертацию под руководством Ханса Хана, одного из основателей знаменитого «Венского кружка». В 1933 г. Гёдель становится приват-доцентом и в том же году впервые отправляется в США, для того чтобы принять участие в работе открытого в том же году Института перспективных исследований (Institute for Advanced Study, IAS) в Принстоне. В IAS Гёдель знакомится с американским математиком и логиком Алонзо Чёрчем и его учениками, а также с Альбертом Эйнштейном, который в будущем станет близким другом математика[328].

Рис. 43. Курт Гёдель и Альберт Эйнштейн

В 1934 г. Гёдель выступает в IAS с серией лекций «О неразрешимых теоремах формальных математических систем». Завершив курс в мае 1934 г., Гёдель возвращается в Вену. Его второй короткий визит в IAS продлился с октября по ноябрь 1935 г., но был прерван из-за приступа депрессии и выгорания[329]. Возвращение домой не принесло покоя учёному. В июне 1936 г. Мориц Шлик, семинар которого пробудил в своё время у Гёделя интерес к логике, был убит одним из своих бывших учеников Иоганном Нельбеком. Убийство Шлика вызвало у Гёделя тяжёлый нервный кризис. У него появились параноидальные симптомы, в том числе страх быть отравленным, в результате чего математик провёл несколько месяцев в санатории для лечения нервных заболеваний. Современные исследователи расходятся во мнениях относительно мотивов убийства — не исключено, что дело было в банальной

ревности[330]. Тем не менее в своих собственных объяснениях убийца был весьма категоричен: он предъявлял Шлику обвинения в разложении культуры «христианского сословного государства» путём распространения неопозитивистских идей, говорил о вредоносности и «еврействе» произведений и лекций Шлика. Благодаря этим высказываниям Нельбек был помилован вскоре после того, как 12 марта 1938 г. Австрия в результате аншлюса стала частью фашистской Германии.

Немецкие власти отменили титул приват-доцента, поэтому Гёдель, в соответствии с новым порядком, должен был подать заявку на другую должность. Заявка была отклонена — против Гёделя сработали его былые связи с еврейскими членами «Венского кружка», особенно с Ханом.

20 сентября 1938 г. Гёдель женится на Адели Нимбурски, с которой он к тому времени был знаком более десяти лет. Семья не одобряла отношения Гёделя с разведённой танцовщицей, которая к тому же была старше его на шесть лет. В своих воспоминаниях брат Курта, Рудольф, писал: *«Семья была недовольна его выбором. Конечно, она не была ему ровней в интеллектуальном плане, но это-то как раз было в порядке вещей. Она была выходцем из простонародья, чьи родители также жили на Лангегассе. Её отец был фотографом»*[331]. Впрочем, наперекор всем предубеждениям в отношении детей фотографов сердечный союз между Куртом и Адель в итоге оказался очень крепким.

1 сентября 1939 г. началась Вторая мировая война. Положение Гёделя ещё более ухудшилось, поскольку немецкая армия нашла его пригодным для призыва на службу. Супруги решают покинуть Вену и бежать в США. Чтобы избежать затруднений при пересечении Атлантики, Курт и Адель добрались по Транссибирской магистрали до Тихого океана, на корабле пересекли океан, преодолев путь до Сан-Франциско, откуда на поезде отправились в Принстон, где Гёдель получил должность в IAS.

5 декабря 1947 г., когда Эйнштейн и Оскар Моргенштерн сопровождали Гёделя на экзамен на получение гражданства США, Гёдель признался им, что обнаружил формальный дефект в тексте Конституции, который мог позволить США стать диктатурой. Эйнштейн и Моргенштерн были обеспокоены тем, что непредсказуемое поведение их друга может поставить под угрозу результаты экзамена. Судьёй оказался Филипп Форман, который знал Эйнштейна и участвовал в слушаниях по его гражданству. Всё шло гладко, пока Форман не спросил Гёделя, думает ли он, что США могут прийти к диктатуре, подобной нацистскому режиму. Гёдель тут же начал объяснять своё открытие Форману. Форман понял, что происходит, прервал Гёделя и перешёл к следующему вопросу, после чего вынес рутинное положительное заключение[332]. Эта точка стала последним поворотным пунктом в судьбе математика, окончательно связавшим его жизнь с США.

Позже в своей жизни Гёдель перенёс периоды психической нестабильности и болезни. Одержимый навязчивым страхом быть отравленным, он ел только ту еду, которую его жена готовила для него. В конце 1977 г. Адель была

госпитализирована на шесть месяцев и больше не могла готовить для мужа. В её отсутствие он перестал есть и в конце концов умер от голода[333].

В ходе споров, развернувшихся между Чёрчем и Гёделем во время первого визита Гёделя в Принстон, произошло столкновение двух разных подходов к проблеме эффективной вычислимости. В отличие от Гёделя, который стремился создать способ описания всех возможных функциональных зависимостей, в том числе для функций, значения которых являются определёнными не для всех значений аргументов, Чёрч отталкивался не от функций, а от возможных способов вычисления. В итоге для формализации и анализа понятия вычислимости он создал «лямбда-исчисление» — систему, позволяющую при помощи минимальных средств выразить способ решения любой вычислимой задачи, имеющей символьное представление. После появления знаменитых теорем Гёделя о неполноте Чёрч первое время надеялся, что его лямбда-исчисление свободно от ограничений формальной арифметики, найденных Гёделем. Чёрч ошибочно полагал, что изъян формальной арифметики заключается в проблеме типизации, однако в конце 1933 — начале 1934 г. ученики Чёрча, Джон Россер и Стивен Клини, смогли показать, что лямбда-исчислению не удаётся избежать найденного Гёделем ограничения (Клини это открытие, кстати говоря, стоило переписывания почти готовой диссертации). Не растерявшись, Чёрч предложил использовать лямбда-исчисление в качестве способа определения эффективно вычислимых задач. Тезис Чёрча гласил: любая лямбда-определимая функция является эффективно вычислимой. Гёдель поначалу воспринял эту идею без особого энтузиазма, он считал, что эффективную вычислимость нужно сформулировать в виде набора общепризнанных аксиом[334]. «Особая уличная магия» Чёрча не вызывала у Гёделя большого восторга.

Третий подход к вопросу об эффективной вычислимости был представлен в работах Алана Тьюринга.

Мы уже несколько раз упомянули Алана Тьюринга, и стоит сказать несколько слов о его биографии. Тьюринг происходил из древнего шотландского рода, имевшего, по всей видимости, французское происхождение. Его предки в течение нескольких поколений владели баронством Турин (Tourin) в Форфаршире (Forfarshire). Сэр Уильям Тьюрин был сподвижником короля Шотландии Давида II, разделив с ним изгнание. Впоследствии его лояльность была вознаграждена: ему было пожаловано баронство Фоверан (Foveran) в Абердиншире (Aberdeenshire), которым его потомки владели более 300 лет[335, 336]. С 1613 г. получило распространение новое (английское) написание фамилии — Тьюринг (Turing).

Родители Алана Тьюринга познакомились и поженились в Индии. Отец был служащим английского колониального ведомства, а мать — дочерью главного инженера Мадрасской железнодорожной компании. Алан был младшим ребёнком в семье (его брат Джон был на четыре года старше). В детстве Алан и Джон редко видели родителей — отец служил в Индии, где они с матерью проводили значительную часть времени вплоть до

1926 г., а дети оставались в Англии и жили на попечении в частных домах. В шесть лет Алан научился читать и увлёкся чтением научно-популярных книг. В одиннадцать он уже ставил химические опыты, впрочем проявляя мало интереса к другим предметам[337].

В 13 лет Алан поступил в престижную Шерборнскую школу (Sherborne Public School). Учебные успехи Тьюринга были крайне неровными. По меткому замечанию директора школы, Алан *«...пытался построить крышу, не заложив фундамента»*. Провалы юноши чередовались с впечатляющими успехами. Он испытывал трудности в изучении языков и в то же время завоевал множество наград по математике. Но даже в ней он, увлекаясь сложными задачами, порой не уделял достаточно внимания основам. По всей видимости, его успехи напрямую зависели от интереса к изучаемому предмету. В письме матери Тьюринга директор школы Ноуэлл Смит дал Алану следующую характеристику: *«Этот мальчик из тех, кто непременно станет некоторой проблемой для любой школы или сообщества, будучи в определённом смысле явно антисоциальным. Но я думаю, что в нашем сообществе у него есть хорошие шансы развить свои особые способности и в то же время немного научиться искусству жизни»*. Несмотря на трудности социализации, которые испытывал Алан, директор проявлял участие и терпение. Он считал, что этому мальчику (которого он в шутку прозвал «Алхимик») суждено сделать важный вклад в науку. Перед тем как директор Ноэулл Смит ушёл в 1927 г. в отставку, его жена (знавшая многих учеников) писала матери Тьюринга: *«Мы будем с большим интересом следить за карьерой вашего мальчика. Я убеждена, что он сделает что-то великое в науке. Каждый раз, когда я встречала его, даже когда он помогал мне пропалывать сад, я чувствовала его силу. Полагаю, что он очень часто раздражает, я не знаю, что это такое... но подобное часто бывало с великими учёными, в детстве они были похожи на вашего мальчика»*.

И действительно, интересы мальчика позволяли предположить, что ему суждено стать учёным. Уже в 15 лет он самостоятельно освоил основы общей теории относительности и квантовой механики (хотя в ту пору эти теории ещё не были общепринятыми среди физиков). В 1928 г. в школе появился новый ученик — Кристофер Морком, который стал другом Алана. Кристофер разделял интерес Тьюринга к науке, и позже друзья решили вместе поступать в Кембридж. Однако с первой попытки сделать это удалось только Кристоферу — Алан сдал экзамен в Кембридж, но был квалифицирован только на *exhibition* (вид стипендии, который ниже, чем обычная *scholarship*), и родители решили, что ему стоит пока остаться в школе и попробовать поступить ещё раз через год[338]. Однако 13 февраля 1930 г. Кристофер внезапно умер[339] от осложнений «бычьего туберкулёза» — юноша заболел, выпив заражённого молока[340]. Скоропостижная смерть друга потрясла семнадцатилетнего Тьюринга, и впоследствии он много рассуждал о проблеме человеческого существования.

Со второй попытки Алану всё же удаётся поступить в университет — в 1931 г. он становится студентом кембриджского Кингс-колледжа. Юноша

продолжает интересоваться физикой — большое впечатление на Алана произвела книга фон Неймана «Математические основы квантовой механики» (Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik). Читая её, Тьюринг не предполагал, что всего через несколько лет фон Нейман предложит ему место в Принстоне — одном из самых престижных университетов США, а ещё позже фон Нейман, так же как и Тьюринг, станет одним из признанных «отцов информатики». В университете Тьюринг занимается математикой под руководством известного учёного Макса Ньюмана. Позже, во время работы Тьюринга над взломом немецких шифров, уже Ньюман будет работать под руководством своего ученика. В свободное время Тьюринг проводит химические опыты, решает шахматные задачки, играет в го (игра интересовала его как модель для решения математических задач из теории групп), занимается спортом (греблей и бегом).

Тьюринг блестяще оканчивает четырёхлетний основной курс обучения. За свою работу в области теории вероятностей Алан получает специальную премию и звание King's College Fellow, представлявшее собой нечто среднее между аспирантом и преподавателем[341]. Именно в это время он начинает заниматься проблемами, которые позже привели его к созданию теории логических вычисляющих машин.

Тьюринг отталкивался от конструкции гипотетического устройства, способного решить любую «эффективно вычислимую задачу». Таким гипотетическим устройством стала машина Тьюринга (далее — МТ), впервые описанная в статье «О вычислимых числах, с приложением к проблеме разрешимости» (On the Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem)[342]. Рассмотрим её конструкцию.

Первым элементом МТ является лента бесконечной длины, разделённая на ячейки. Каждая ячейка может хранить произвольный символ (на практике достаточно двух: 0 и 1). Кроме того, есть считывающая головка, способная обследовать одну ячейку ленты. После обследования лента может быть смещена на одну ячейку влево или вправо по отношению к головке. МТ руководствуется набором правил перехода. В каждый момент она находится в определённом состоянии, которому соответствует некоторое подмножество правил перехода. Каждое правило гласит: если машина находится в состоянии X с символом Y в ячейке ленты, пребывающей под считывающей головкой, то символ Y следует заменить новым символом Y', переместить ленту на одну ячейку влево или вправо и изменить состояние на X'. Произвольное множество правил может быть само записано в виде последовательности символов на ленте МТ. Тьюринг использовал это свойство для определения понятия универсальной машины Тьюринга (УМТ), которая представляет собой МТ, способную имитировать произвольную МТ по её описанию на ленте. Такая способность УМТ напоминает способность молекулы ДНК кодировать саму себя[343].

В заголовке работы Тьюринга мы встречаем странное слово *Entscheidungsproblem*, которое у людей, не являющихся носителями немецкого языка, вероятно,

ассоциируется с заклинаниями для вызова потусторонних сил. Почему Тьюринг, родившийся в лондонском Сити и практически всю жизнь проживший в Великобритании, решил в названии одной из самых значимых своих работ перейти на немецкий язык?

Entscheidungsproblem в переводе с немецкого дословно означает «проблема (или задача) решения», по-русски мы обычно говорим «проблема разрешения». Впервые проблема была сформулирована в 1928 г. Давидом Гильбертом, едва ли не самым известным математиком XX столетия. Вопрос задачи звучит следующим образом: существует ли алгоритм, который, получив на вход утверждение, отвечает «да» или «нет» в зависимости от того, является ли данное утверждение «универсально справедливым»? В соответствии с теоремой Гёделя о полноте исчисления предикатов утверждение является «универсально справедливым» тогда и только тогда, когда оно может быть выведено из аксиом. Поэтому проблему разрешения можно рассматривать как вопрос о существовании алгоритма, позволяющего определить, можно ли, используя правила логики, вывести заданное утверждение из аксиом. В 1936 г. Чёрчу удалось доказать принципиальную невозможность создания такого алгоритма. В том же году, но несколько позже этот же результат независимо получил и Тьюринг, и именно этому посвящена его статья «О вычислимых числах...». Сегодня мы называем полученный результат теоремой Чёрча — Тьюринга.

Тьюринг доказал, что его «универсальная вычислительная машина» способна выполнять любые мыслимые математические вычисления, если они могут быть представлены в виде алгоритма. Для того чтобы показать неразрешимость проблемы разрешения, Тьюринг доказал, что проблема остановки (halting problem) для машин Тьюринга неразрешима: невозможно гарантированно за конечное количество шагов алгоритмически решить, остановится ли когда-нибудь произвольно взятая машина Тьюринга.

Хотя доказательство Тьюринга было опубликовано после аналогичного доказательства Чёрча, выполненного на основе лямбда-исчисления, подход Тьюринга выглядел более наглядным. Идея УМТ, то есть такой гипотетической машины, которая способна выполнять задачи любой другой вычислительной машины, оказалась весьма продуктивной. Согласно тезису Чёрча — Тьюринга, машины Тьюринга и лямбда-исчисление способны вычислять всё, что можно в принципе вычислить.

В 1939 г. Джону Россеру удалось доказать, что все три подхода — общерекурсивные функции Гёделя, универсальная машина Тьюринга и лямбда-исчисление Чёрча — являются взаимно эквивалентными и, следовательно, все три могут быть равнозначно использованы для определения эффективной вычислимости.

Интересными побочными продуктами изысканий Тьюринга стали понятия тьюринг-эквивалентности и тьюринг-полноты. Две машины P и Q являются тьюринг-эквивалентными, если машина P может симулировать работу машины Q и, наоборот, машина Q может симулировать работу машины P. Тьюринг-полной

машиной называется машина, способная симулировать работу машины Тьюринга. Разумеется, не существует физических устройств, обладающих бесконечным объёмом памяти — аналогом бесконечной ленты МТ. Но это ограничение при использовании понятия тьюринг-полноты обычно игнорируется, то есть тьюринг-полными называют машины, которые при наличии у них бесконечной памяти могли бы выполнять любые вычисления, доступные МТ.

В свете теоретических работ Тьюринга над проблемой разрешения становится более понятной идея, лежащая в основе теста Тьюринга. Признать наличие разума у машины можно будет тогда и только тогда, когда будет на практике доказана способность этой машины симулировать человеческий разум. Так называемый физический тезис Чёрча — Тьюринга гласит: любая функция, которая может быть вычислена физическим устройством, может быть вычислена машиной Тьюринга. Если он верен, то тьюринг-полная машина способна вычислить всё, что в принципе может быть вычислено. Неудивительно, что создание первых тьюринг-полных компьютеров стало важнейшей вехой в истории развития вычислительной техники.

Так кому же принадлежит приоритет в создании такой машины? В своей работе, написанной в 1997 г., доктор Рауль Рохас показал, что машина Цузе Z3 может рассматриваться как тьюринг-полная. Для этого, однако, нужно совершить некоторый трюк, а именно склеить между собой два конца перфоленты, кодирующей программу. В машине Цузе не было операторов цикла или условного перехода, однако создание искусственного цикла, в который будет обёрнуто «тело» программы, позволяет тем не менее достичь желанной тьюринг-полноты. В принципе, подобный трюк мог бы быть возможен для Z1 и Z2, однако в случае Z1 машина не останавливалась при делении на ноль[344] (единственной причиной остановки было достижение конца программы), что делало при закольцованной ленте остановку машины невозможной, следовательно, Z1 даже теоретически не могла стать тьюринг-полной машиной, а Z2, как указывает профессор Рохас, испытывала большие проблемы ввиду ненадёжности работы многочисленных реле и так и не стала полностью функциональной машиной[345].

По крайней мере до 1946 г. Harvard Mark I умел выполнять операции лишь строго последовательно[346], а без возможности осуществления условного перехода машина не может быть тьюринг-полной.

Mark I и первые машины Цузе стали первыми электромеханическими машинами, преодолевшими барьер тьюринг-полноты. Однако, несмотря на эти выдающиеся результаты, ресурсы технологии, лежащей в их основе, уже были исчерпаны. На смену этим могущественным гибридам пришли электронные машины.

Забытый изобретатель Джон Винсент Атанасов 2.7.5

Многие годы считалось, что первой ЭВМ была машина ENIAC (от Electronic Numerical Integrator and Computer — электронный численный интегратор и компьютер), созданная Джоном Мокли и Джоном Эккертом и запущенная в эксплуатацию 10 декабря 1945 г.

Однако в начале 1970-х гг. это утверждение было подвергнуто сомнению. Первой ласточкой стал иск, поданный в 1971 г. Sperry Rand Corporation к CDC и Honeywell, а окончательный крест на приоритете ENIAC был поставлен после того, как были рассекречены материалы о компьютере Colossus. В настоящее время считается, что первой электронной (хотя и не тьюринг-полной) машиной стал компьютер ABC Джона Атанасова и Клиффорда Берри, а второй — компьютер Colossus Mark I Томаса Флауэрса. В ходе судебного разбирательства по иску 1971 г., длившегося 135 рабочих дней, были заслушаны показания 77 свидетелей, занявшие в общей сложности около 20 000 страниц стенограмм. Вердикт судьи окружного суда Миннесоты Эрла Р. Ларсона, вынесенный 19 октября 1973 г., гласил: основные идеи, лежавшие в основе ENIAC, были получены от Атанасова, изобретение, заявленное в ENIAC, также было совершено Атанасовым. Суд установил тот факт, что Мокли присвоил идеи Атанасова и в течение более тридцати лет подсовывал их миру в качестве собственных. Патент Мокли и Эккерта был отозван[347].

Сегодня, почти полвека спустя, у этого судебного решения находится немало критиков. Попробуем пролить немного света на эту детективную историю, разыгравшуюся в конце 1930-х — начале 1940-х гг.

Джон Винсент Атанасов был первым из девяти детей, родившихся в семье американского инженера-электрика болгарского происхождения Ивана Атанасова и Ивы Лусены Парди, учительницы математики. Вот что писал Джон об отце: *«Мой отец родился 6 января 1876 года, в то время, когда наш народ готовил восстание против турок. Незадолго до начала восстания турецкие власти вынудили жителей деревни Бояджик покинуть свои жилища, а затем подожгли дома. Мой дедушка бежал с сыном на руках, за ним следовала моя бабушка, и в этот момент группа турецких солдат дала залп ему в грудь. Пуля, убившая его, оставила шрам на лбу моего отца на всю оставшуюся жизнь. Моя бабушка была замужем ещё дважды. Моему отцу было 13 лет, когда он приехал в Соединённые Штаты, а в 15 лет он осиротел. После столь невероятного начала своей жизни он окончил Колгейтский университет и женился на моей матери, американке, дедушка которой участвовал в Гражданской войне между Севером и Югом»*[348,349].

В 1903 г. семья с новорождённым Джоном переехала во Флориду, где его отец получил должность инженера-электрика в Остине, а затем в промышленном городке Брюстере, основанном в 1910 г. компанией American Cyanamid. В наши дни Брюстер представляет собой пустынный город-призрак,

официальное население которого, по данным переписи 2010 года, составляет три человека[350]. Джон хорошо учился в школе, увлекался спортом, особенно бейсболом. Но когда отец приобрёл новую логарифмическую линейку — она произвела неизгладимое впечатление на мальчика и изменила его интересы.

Джон заинтересовался математическими принципами работы линейки, и это привело его к изучению тригонометрических функций. С помощью своей матери он прочитал «Алгебру в колледже» (A College Algebra)[351] Джеймса Тейлора. Эта книга содержала начала дифференциального исчисления, главу о бесконечных рядах и о вычислении логарифмов. В течение нескольких месяцев девятилетний вундеркинд смог освоить азы математической науки в достаточной степени для того, чтобы далее обходиться без посторонней помощи. За это время, опираясь на помощь мамы, он узнал о различных системах счисления, в том числе о двоичной.

Джон окончил среднюю школу в 15 лет, получив отличные оценки по естественным наукам и математике. Юноша всерьёз мечтал о карьере физика-теоретика. В 1921 г., предварительно отработав год на поисках залежей фосфата, чтобы скопить деньги на учёбу, Джон поступил во Флоридский университет в Гейнсвилле, а поскольку в университете не было такой специальности, как теоретическая физика, Атанасов выбрал изучение электротехники. Окончив университет в 1925 г., Джон получил степень бакалавра наук в области электротехники с наивысшим средним баллом — A (отлично). Многие вузы, включая Гарвард, приглашали Джона на позицию преподавателя, но в итоге он принял полученное первым приглашение Колледжа сельского хозяйства и механических искусств штата Айова (ныне — Университет штата Айова), расположенного в городе Эймсе и имевшего хорошую репутацию в области науки и технологий[352].

В марте 1929 г. он поступил в Висконсинский университет в Мадисоне в качестве соискателя степени доктора философии в области теоретической физики. Работа над диссертацией по теме «Диэлектрическая постоянная гелия» дала Атанасову первый опыт серьёзных вычислений. Он часами работал на калькуляторе «Монро», одной из самых совершенных вычислительных машин того времени. Занимаясь расчётами, Атанасов заинтересовался разработкой более совершенной и быстрой вычислительной машины. Этим он и решил заняться по возвращении в свой вуз в Айове после успешной защиты диссертации в июле 1930 г.

Осенью того же года Атанасов получает должность доцента (Assistant Professor) и начинает эксперименты с электронными лампами и другими электронными устройствами. В 1936 г. совместно с коллегой по вузу физиком-атомщиком Гленном Мёрфи и аспирантом Линном Ханнумом Атанасов создал лаплациометр — прибор для решения уравнения Лапласа с различными краевыми условиями[353].

Он был основан на более ранней модели, которая создавала физическую модель дифференциального уравнения в мыльной плёнке. Атанасов и Ханнум выбрали парафин из-за его большей стабильности. В итоге лаплациометр

2.7.5

Забытый изобретатель Джон Винсент Атанасов

представлял собой 100-фунтовые блоки парафина, являющиеся физическими воплощениями решения уравнения Лапласа.

Атанасов продемонстрировал, что лаплациометр может получать решения задач кручения с погрешностью не более 2% относительно теоретических значений. Кроме лаплациометра, он создал специальный аналоговый калькулятор для оценки «индекса гранулярности» фотографий[354].

Вообще, 1930-е гг. были периодом активного поиска различных аналоговых вычислительных схем. Примерно в то же время, когда Атанасов и Ханнум занимались опытами с лаплациометром, советский учёный Владимир Лукьянов создал свой первый гидравлический интегратор — аналоговое вычислительное устройство, предназначенное для решения дифференциальных уравнений, в основе которого лежит идея измерения объёма жидкости, поступающей в некоторый сосуд. Поскольку объём жидкости в сосуде является интегралом от функции, описывающей поступление жидкости в этот сосуд, то, задавая скорость расхода воды на основе некоторой функции, можно получать численное значение её интеграла. Эта идея оказалась вполне жизнеспособной для того, чтобы устройства на её основе получили весьма широкое распространение. Лукьянову удалось создать модульную конструкцию, которая легла в основу серийных машин, выпуск которых начался в 1955 г. на Рязанском заводе счётно-аналитических машин. Гидроинтеграторы ИГЛ (интегратор гидравлический системы Лукьянова) получили весьма широкое распространение в СССР и странах соцлагеря. Эти устройства успешно использовались для решения задач в области геологии, шахтостроения, гидротехники, металлургии, ракетостроения и других отраслей до середины 1980-х гг.[355]

Но вернёмся к Атанасову. В 1935–1937 гг. он работал над модификацией табулятора компании IBM — сначала для анализа спектров, а затем для решения систем линейных уравнений. Атанасов написал статью «Решение систем линейных уравнений с использованием перфокартного оборудования», в которой привёл схематический эскиз вспомогательного устройства. В апреле 1937 г. он написал письмо в IBM относительно этой идеи (позже в ходе судебного разбирательства было раскрыто внутреннее письмо IBM, в котором говорилось: *«…не подпускайте Атанасова к табулятору»*). В конечном итоге он отказался от этой схемы как от непрактичной, в первую очередь из-за малого объёма памяти машины.

В один из холодных зимних вечеров 1937-го Атанасов, *«разочарованный тем, что его работа казалась запутанной и зашедшей в тупик»*[356], сел в свой новенький Ford V8 и поехал на восток (внучка Атанасова, Таммара Бёртон, отмечает, что её дед менял машины каждый год[357]). Позже он скажет в интервью: *«Это был вечер скотча и езды на машине со скоростью 100 миль в час, когда у меня родилась идея машины с электронным управлением, в которой двоичные числа использовались бы вместо традиционных десятичных, память была бы основана на конденсаторах и существовал бы регенеративный процесс для предотвращения потери памяти из-за сбоя электричества»*. Проехав

200 миль, он остановился в придорожной забегаловке в штате Иллинойс. Здесь Атанасов выпил бурбона с содой (он был любителем быстрых машин и шотландского виски, а в Айове в это время всё ещё действовал сухой закон), продолжая думать о создании машины. Немного расслабившись, Атанасов понял, что мысли его прояснились. Он взял салфетку и начал их записывать.

В начале 1938 г. Атанасов продумал в общих чертах устройство цифровой электронной машины для решения больших систем линейных уравнений и начал искать финансирование. В марте 1939 г. он подал заявку и через два месяца получил от своего колледжа грант в размере 650 долларов (200 долларов на материалы и 450 на оплату работы ассистента) на изготовление прототипа. Помощником Атанасова стал студент-электротехник Клиффорд Берри, которого Джону порекомендовал его друг и коллега профессор электротехники Гарольд Андерсон. Рабочий прототип удалось создать в короткие сроки, и в декабре 1939 г. он был с успехом продемонстрирован администрации колледжа: та решила, что проект Атанасова заслуживает гранта Исследовательского совета в размере 5000 долларов для построения полномасштабного устройства.

Работы над машиной, ставшей затем известной под названием ABC (Atanasoff-Berry Computer — компьютер Атанасова и Берри), стартовали в начале 1940 г., а уже в конце 1941-го состоялись первые испытания, показавшие, что арифметический блок и двухбарабанный модуль памяти работали

2.7.5

Забытый изобретатель Джон Винсент Атанасов

отлично, как и большая часть компонентов системы ввода-вывода. Однако электронный механизм чтения и записи карт, который Атанасов изобрёл для промежуточного хранения вычисленных уравнений, иногда давал сбои. Хотя отказы происходили в среднем реже одного раза на 10 000 попыток, их всё-таки было достаточно для того, чтобы при решении больших систем уравнений периодически возникали ошибки.

Весивший около 315 кг ABC был размером с письменный стол и содержал 280 электронных ламп и 31 тиратрон *. Используя модифицированную версию алгоритма Гаусса[358], машина могла решать большие системы линейных уравнений (до 29 уравнений, при этом каждый из тридцати коэффициентов каждого уравнения имел точность около пятнадцати десятичных знаков).

Весной 1940 г., в разгар работы над машиной, впервые возникла идея, что её хорошо бы запатентовать. Создатели подготовили объёмную рукопись с описанием и чертежами. Одну из её копий в конце того же года отправили в Чикаго — патентному юристу Ричарду Трекслеру, нанятому колледжем для консультации по поводу способов защиты воплощённых в устройстве изобретений. Но в 1942 г. Атанасова и Берри призвали на военную службу, из-за чего они так и не успели решить проблему со сбоями в системе чтения и записи карт, а также не довели до конца вопрос с патентами.

Возвратившись же в конце 1948 г. из вооружённых сил, Атанасов узнал, что машину убрали из Физического корпуса и демонтировали. Он был удивлён и разочарован этим: о том, что компьютер собираются уничтожить, ни его, ни Клиффорда Берри никто не уведомил. От машины осталось лишь несколько деталей.

Атанасов не заработал ни цента на своём изобретении. *«Я не был одержим идеей, что изобрёл первую вычислительную машину,* — говорил он. — *Если бы я знал о том, что именно было в моей машине, я бы продолжал работу над ней»*. После ухода в отставку в 1961 г. он работал над частными проектами, пока весной 1967-го, к его удивлению, с ним не связались адвокаты трёх крупных компьютерных компаний — Control Data Company (CDC), Honeywell и General Electric — по вопросу спора со Sperry Rand Corporation по поводу так называемых патентов ENIAC. Создатели компьютера ENIAC — Мокли и Эккерт — подали заявку на патент в 1947 г. и получили его в 1964-м. Поскольку Sperry Rand являлась наследником компании Мокли и Эккерта, а вместе с ней и их патентных прав, Honeywell и другие компании, производящие электронные вычислительные машины, были поставлены перед фактом необходимости уплаты патентных отчислений. Юристам Honeywell и CDC удалось узнать о компьютере Атанасова, хотя до начала судебного разбирательства о его существовании упоминалось лишь в трёх коротких газетных заметках 1940-х гг. и в книге «Электронные цифровые системы» (Electronic Digital Systems) Ричарда Ричардса, опубликованной в 1966 г. (Ричардс был

* Тиратрон — ионный (газоразрядный) прибор для управления электрическим током с помощью напряжений, поданных на его электроды.

другом Берри и видел в 1941-м машину Атанасова). По всей видимости, именно эта книга стала источником информации для адвокатов.

Атанасов, нанятый в качестве консультанта CDC и Honeywell, предоставил всю имевшуюся информацию и согласился выступить в качестве свидетеля на судебном процессе. Во время длительного разбирательства Атанасов произвёл на суд хорошее впечатление своими манерами и показаниями, в отличие от Мокли, который трижды менял свои показания под присягой и пренебрежительно высказывался об Атанасове и его компьютере. Было доказано, что во время их первой встречи в декабре 1940 г. Атанасов рассказал Мокли о своей работе, а затем пригласил его в Айову, поскольку Мокли изъявил желание увидеть машину собственными глазами.

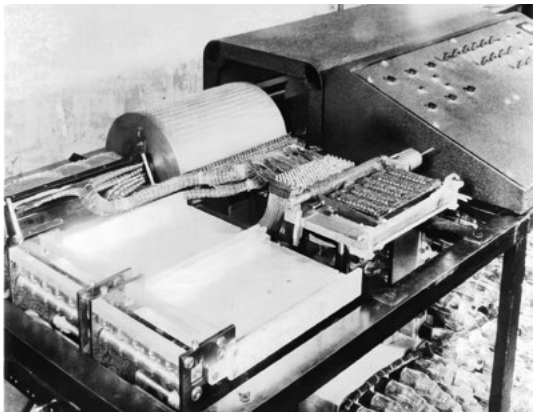


Рис. 44. Компьютер Атанасова и Берри

С 13 по 18 июня 1941 г. Мокли гостил в доме Атанасова в Эймсе. Эти дни он провёл в долгих обсуждениях принципов работы машины Атанасова и Берри с её создателями. В течение трёх или четырёх дней Мокли наблюдал за работой компьютера. Кроме того, Атанасов дал прочитать Мокли свою рукопись, описывающую устройство и функции машины. Сразу же после возвращения из Айовы Мокли написал письмо своему другу-метеорологу Генри Клайтону, выразив энтузиазм по поводу компьютера Атанасова и Берри. 15 августа 1941 г. Мокли написал подробную работу о разнице между аналоговыми калькуляторами и импульсными устройствами, в которой содержался ряд идей, практически идентичных идеям из рукописи Атанасова. 30 сентября 1941 г. Мокли написал Атанасову, предлагая совместные усилия по разработке ABC, и спросил, есть ли у Атанасова какие-либо возражения против использования некоторых идей Атанасова в вычислительной машине, которую Мокли планирует создать.

Трудно сказать, был бы вердикт суда более мягким, если бы Мокли вёл себя в процессе разбирательства более осмотрительно. В конце концов, ENIAC был серьёзным шагом вперёд в сравнении с ABC. Во-первых, ENIAC был куда более масштабным проектом: превосходивший Harvard Mark I по скорости вычислений примерно в 300 раз[359] и весивший около 27 т, электронный монстр Мокли и Эккерта содержал в своей конструкции 17 468 электронных ламп, 1500 реле, 500 000 контактов, 70 000 резисторов, 10 000 конденсаторов и потреблял 174 киловатта[360] — одни только счета за электричество составляли около 60 долларов в день[361]. И во-вторых, что более важно, ENIAC, в отличие от узкоспециализированного ABC, был тьюринг-полной машиной.

ENIAC мог выполнять сложные последовательности операций с циклами, ветвлениями и подпрограммами, однако, в отличие от современных компьютеров с хранимыми программами, ENIAC был набором различных арифметических устройств, программирование которых осуществлялось за счёт множества поворотных переключателей, гнёзд и сети соединительных кабелей[362]. Создание программы для решения новой задачи обычно занимало недели, из которых только ввод программы в машину мог растягиваться на несколько дней. За этим следовал период отладки, которая могла осуществляться в режиме пошагового выполнения программы[363].

Первоначальная команда программистов ENIAC состояла из шести девушек: Кей Макналти, Бетти Дженнингс, Бетти Снайдер, Марлин Уэскофф,

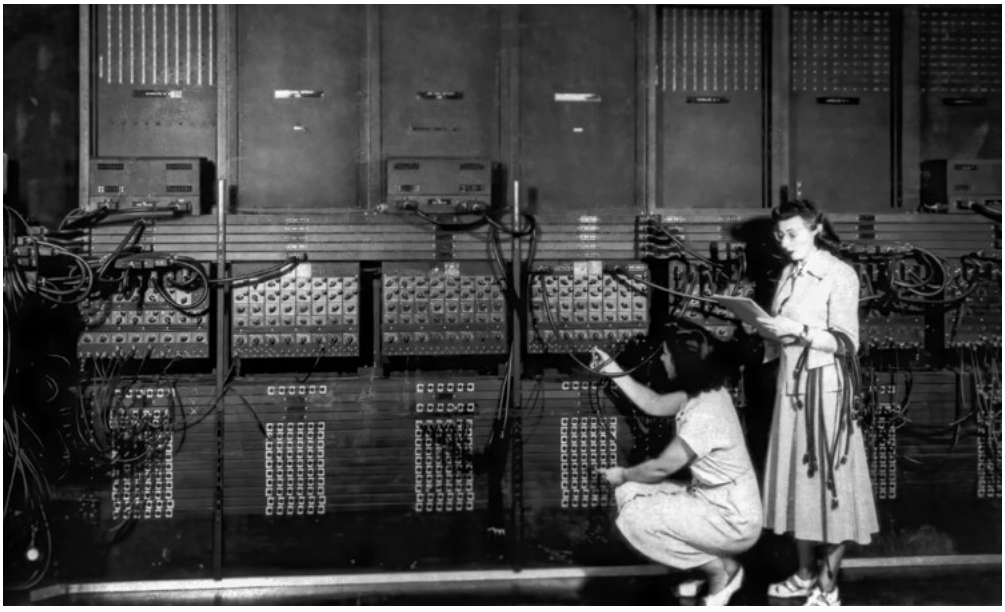


Рис. 45. Девушки из команды программистов ENIAC

Фрэн Билас и Рут Лихтерман. Они не только составляли и вводили программы, но и занимались поиском сбоев и были способны сузить область поисков до конкретной сгоревшей лампы[364].

Хотя радиолампы перегорают не очень часто, из-за их огромного числа в конструкции ENIAC машина находилась в неработоспособном состоянии примерно половину времени. Особенно остро проблема стояла до 1948 г., пока не появились специальные высоконадёжные лампы. Инженерам удалось сократить количество отказов до более приемлемого уровня — одна лампа перегорала примерно раз в два дня. По словам Эккерта, на обнаружение проблемы уходило около 15 минут[365]. В 1954 г. самый продолжительный непрерывный период работы без сбоев составлял 116 часов — около пяти дней[366].

Хотя устройство современных компьютеров заметно отличается от устройства ENIAC и несмотря на то, что приоритет Мокли и Эккерта в деле создания первой ЭВМ был оспорен, значение этой машины для будущего вычислительной техники трудно переоценить. В отличие от машины Атанасова, ENIAC активно использовался для решения многих практических задач, и опыт его эксплуатации послужил важным фундаментом дальнейшего развития электронной вычислительной техники.

Взлом немецких военных шифров 2.7.6

История появления электронных машин не была бы полной без рассказа о Блетчли-парке — самоотверженная работа криптоаналитиков, занимавшихся раскрытием немецких шифров во время войны, была многократно воспета в искусстве и, во многом благодаря этому, обросла множеством забавных мифов. Например, собравший множество престижных наград фильм Мортена Тильдума «Игра в имитацию» показывает нам Алана Тьюринга, собственноручно создающего машину «Кристофер» (названную, разумеется, в честь Кристофера Моркома) для взлома кода шифровальной машины «Энигма» (от нем. *Änigma* — загадка). Я не удивлюсь, если среди зрителей этого фильма найдётся немало тех, кто решил, что речь идёт о той самой знаменитой машине Тьюринга. К сожалению, несмотря на сильную драматургию, фильм Тильдума имеет весьма слабое отношение к исторической действительности, особенно в части разработки вычислительных машин в Блетчли-парке.

История создания машин для криптоанализа немецких шифров берёт своё начало в Польше, где под руководством математика и криптографа Мариана Реевского были созданы первые механизмы, облегчающие расшифровку текстов, зашифрованных немецкой портативной шифровальной машиной «Энигма».

В 1932 г. Реевскому вместе с коллегами Генрихом Зыгальским и Ежи Ружицким удалось разгадать устройство «Энигмы», что позволило создать в 1934–1935 гг. первое из устройств для криптоанализа её кодов — циклометр. Однако 15 сентября 1938 г. немцы полностью изменили процедуру шифрования ключей сообщения, сделав циклометр бесполезным. Ответом польских криптоаналитиков стала новая машина Реевского — «Криптологическая бомба» (Bomba kryptologiczna), а также метод перфорированных листов Зыгальского[367].

Благодаря данным разведки криптоаналитики знали, что для шифрования сообщения оператор военной версии «Энигмы» должен был выбрать из кодовой книги так называемый дневной ключ, который состоял из настроек коммутационной панели (Steckerverbindungen), порядка установки роторов (Walzenlage), положений колец (Ringstellung) и начальных установок роторов (Kenngruppen). Однако оператор не должен был использовать дневной ключ для шифрования сообщений. Вместо этого он придумывал новый ключ из трёх букв (Spruchschlüssel) и в начале каждого сообщения дважды передавал его, шифруя символы при помощи дневного ключа. После этого настройки роторов менялись в соответствии с придуманным ключом и производилось шифрование самого сообщения[368].

25–26 июля 1939 г., за пять недель до начала Второй мировой войны, разработки польских учёных и копия шифровальной машины «Энигма» были переданы делегации французских и британских учёных. Встреча состоялась в Бюро шифров в Варшаве[369]. Британцы считали, что польские учёные встретились с большими трудностями дешифровки из-за увеличения числа роторов машины и именно поэтому обратились за помощью к английским коллегам, но Реевский позже отрицал это, заявив, что разработки были переданы в знак дружбы и солидарности между странами-союзниками в борьбе против нацистской Германии.

Впрочем, сам Реевский, по всей видимости, не участвовал в процессе принятия решения. Полковник Стефан Майер, который был намного выше Реевского в иерархии — он был начальником военной разведки, — писал: *«Поскольку угроза войны возрастала, мы решили поделиться своими достижениями в отношении „Энигмы“ с французами и англичанами, несмотря на то что работа не была завершена, в надежде, что работа в трёх группах облегчит и ускорит окончательное решение проблемы „Энигмы“»*. Это звучит более реалистично[370].

Дальнейшая судьба польских криптографов напоминает вычурный шпионский роман, сюжет которого достоин отдельной книги. Мы же мысленно перенесёмся в Блетчли-парк, также известный как Station X, — особняк второй половины XIX в., расположенный около станции Блетчли в городе Милтон-Кинс в графстве Бакингемшир в центре Англии. В период Второй мировой войны в Блетчли-парке располагалось главное шифровальное подразделение Великобритании — Правительственная школа кодов и шифров (Government Code and Cypher School, GC&CS). Здесь и была спланирована операция «Ультра», нацеленная на дешифровку сообщений «Энигмы»[371].

Изучив реплику «Энигмы», Тьюринг и его коллега Гордон Уэлчман, работавшие в Блетчли-парке, заметили, что машина никогда не будет кодировать букву как саму себя. Опираясь на предположения о часто повторяющихся словах и словосочетаниях, которые немцы должны были бы использовать в сообщениях, Тьюринг разработал переборную схему, позволяющую ограничить количество рассматриваемых комбинаций роторов «Энигмы». Однако даже с учётом этого проверка всех вариантов была слишком медленной. Очевидным ответом было устройство, подобное «Бомбе» Реевского. Оригинальная «Бомба» основывалась на повторяющемся дважды зашифрованном ключе в начале каждого сообщения, однако Тьюринг опасался, что немцы скоро обнаружат эту уязвимость и изменят процедуру шифрования. Кроме того, он хотел увеличить скорость перебора. «Бомбы» Реевского могли взломать за пару часов код трёхроторной версии «Энигмы», но теперь роторов было пять, и перебор занимал почти целый день. Хотя у Тьюринга и был некоторый опыт в создании электрического умножителя, он всё же был математиком, а не инженером. К счастью, недалеко от Летчуэрта находилась Британская компания по производству табуляторов (British Tabulating Machine Company, BTM), и её главный инженер Гарольд Кин смог превратить эскизы Тьюринга в работающую машину.

10 марта 1940 г., незадолго до того, как немецкая армия вошла в Голландию, Бельгию и Люксембург, произошло то, чего опасался Тьюринг: немцы прекратили посылать удвоенный текст ключа в начале сообщения, поэтому польский метод взлома перестал работать. Первая «Бомба» Тьюринга, получившая название Victory, прибыла в Блетчли-парк спустя восемь дней. Её изготовление обошлось в 6300 фунтов стерлингов (примерно 100 000 современных фунтов стерлингов), что составляло примерно одну десятую стоимости бомбардировщика Lancaster. Victory была примерно в 300 000 раз быстрее машины Реевского, весила более тонны и включала в себя 36 «скремблеров», каждый из которых эмулировал машину Enigma, и 108 барабанов, выбирающих возможные значения ключей[372].

Рис. 46. Десерт *bombe glacée*

Существует несколько забавных версий относительно выбора названия «Бомба». Если по-польски *bomba* означает «бомба», то слово *bombe*, выбранное в Блетчли, отличается от слова *bomb* (бомба)

и намекает скорее на название популярного десерта *bombe glacée*, или просто *bombe*, — мороженого, имеющего округлую форму и напоминающего внешне пушечное ядро.

С 1930 г. армейская версия «Энигмы» в качестве дополнительной защиты при шифровании использовала коммутационную панель (Steckerbrett), которая заменяла буквы попарно: если *A* преобразуется в *B*, то *B* преобразуется в *A*. Причём схема замен, выполняемых панелью, оставалась неизменной в процессе шифрования, в отличие от преобразований, выполняемых ротором. Используя эту закономерность, Уэлчман смог усовершенствовать «Бомбу», оснастив её так называемой «диагональной доской», что значительно повысило эффективность работы машины. Вторая версия машины, Agnus Dei или Agnes, содержавшая усовершенствования Уэлчмана, начала работать в августе 1940 г.[373]

В течение 1940 г. на двух машинах выполнялся взлом 178 сообщений, почти все из них были успешно дешифрованы. Из-за угрозы потери машин в случае бомбардировки было создано несколько дополнительных станций дешифровки. В июне — августе 1941 г. в Блетчли-парке было от четырёх до шести «Бомб», а после завершения работ по созданию станции в Уэйвендоне (Wavendon) суммарное количество работающих машин в Блетчли, Адстоке (Adstock) и Уэйвендоне составляло уже не менее 24 штук. Это количество возросло примерно вдвое после запуска станции в Гайхорсте (Gayhurst), и ожидалось, что общее количество «Бомб» вскоре увеличится примерно до 70, а их обслуживанием будут заниматься около 700 «ренов»[374], то есть сотрудниц Женской вспомогательной службы ВМС (Women's Royal Naval Service, WRNS; слово *wrens* в английском языке означает птичек семейства крапивниковых, так что из-за созвучия этому слову «птичье» прозвище накрепко приклеилось к названию службы, женщины из которой работали офисными служащими, кладовщицами, связистками, шифровальщицами, операторами радиолокационных станций, электриками, авиамеханиками и т. д.).

В 1942 г. с появлением военно-морской версии «Энигмы» с четырьмя роторами стало ясно, что дешифровщикам потребуется куда более 70 «Бомб», в итоге к маю 1945 г. было построено 155 трёхроторных и 180 четырёхроторных машин[375].

Однако «Энигма» не была единственной шифровальной машиной, которую использовали немцы. В конце 1930-х гг. верховное командование немецкой армии обратилось к компании C. Lorenz AG с просьбой изготовить для них аппарат шифрования с высокой степенью защиты, совмещённый с телетайпом, позволяющий передавать сообщения по радио в условиях полной секретности. C. Lorenz AG разработала шифровальные машины SZ40 и SZ42, основанные на аддитивном методе шифрования сообщений телетайпа. С 1940 г. «Энигма» обычно применялась полевыми подразделениями, а машина Лоренца использовалась для связи на самом высоком уровне (в том числе для передачи приказов Гитлера). В основе работы SZ40 и SZ42 лежала схема, запатентованная в 1918 г. американским инженером Гилбертом Вернамом,

2.7.6

Взлом немецких военных шифров

сотрудником Bell Laboratories. Идея Вернама заключалась в том, чтобы взять случайную ключевую последовательность символов и наложить её на шифруемое сообщение при помощи операции, сегодня известной под названием XOR, или «исключающее или». Наложение той же самой последовательности чисел на зашифрованное сообщение приводило к его расшифровке. Вернам предложил наносить символы ключевой последовательности на бумажную ленту при помощи перфораций, чтобы затем символ за символом использовать их синхронно с символами входного сообщения.

Основная трудность применения этого подхода заключалась в том, что в военное время нужно было обеспечить наличие одинаковых лент со случайными символами на каждом конце линии связи и добиться того, чтобы они были установлены в одну и ту же начальную позицию. Компания Lorenz решила, что с точки зрения удобства эксплуатации будет проще сконструировать машину для генерации последовательности символов ключей. Однако из-за технической сложности генерации истинно случайных последовательностей был использован генератор псевдослучайных чисел, то есть алгоритм, порождающий последовательность чисел, элементы которой почти независимы друг от друга и подчиняются заданному распределению. К сожалению немецкой армии, эти числа были в большей мере псевдо, чем случайными, что и сделало возможной атаку на используемый алгоритм шифрования. Удивительно, что британским специалистам удалось взломать код, несмотря на то что они так и не увидели вживую ни одного из экземпляров машин SZ до самого конца войны.

Джон Тилтман, один из лучших криптоаналитиков Блетчли-парка, заинтересовался зашифрованными сообщениями телетайпа[376]. По донесениям разведки, немцы называли свои беспроводные системы передачи *Sägefisch* (рыба-пила). Это побудило британцев назвать зашифрованный трафик немецкого телетайпа *fish* (рыба), а неизвестный аппарат и перехваченные сообщения — *tunny* (тунец)[377]. Тилтман знал о системе Вернама и вскоре определил, что сообщения зашифрованы именно таким способом. Тилтман рассуждал так: поскольку система Вернама зависит от набора ключевых символов, то, если операторы допустят ошибку и используют одну и ту же ключевую последовательность для двух сообщений, при наложении двух зашифрованных текстов друг на друга наложенная ключевая последовательность будет удалена. И действительно, в августе 1941-го немецкие операторы совершили ошибку, отправив два последовательных сообщения с одним и тем же ключом (что было строго запрещено инструкциями). Британцы сумели перехватить оба сообщения, и Тилтман смог восстановить оба текста. Это был прорыв[378].

Благодаря расшифровке текста сообщений специалисты Блетчли-парка смогли восстановить и часть ключа, использованную при их шифровании, получив около 4000 последовательно идущих символов ключевой последовательности. Дальнейшие надежды были связаны с возможностью нахождения в ней каких-либо закономерностей, чтобы понять процесс генерации ключа.

Удача улыбнулась Уильяму Татту, присоединившемуся к проекту в октябре 1941 г. До поступления в Блетчли-парк Татт изучал химию, а затем математику в кембриджском Тринити-колледже. В программу обучения входил так называемый метод Касиски — метод криптоанализа полиалфавитных шифров, таких как шифр Виженера, изобретённый независимо Фридрихом Касиски и Чарльзом Бэббиджем. При использовании этого метода зашифрованное сообщение разбивают на фрагменты одинаковой длины, а затем записывают их в столбик друг под другом. Увеличение частоты появления некоторых символов в столбцах полученной матрицы свидетельствует о том, что её ширина равна длине использовавшегося при шифровании ключа. Это происходит потому, что в естественном языке существуют часто встречающиеся символы, например пробелы, и при совмещении их с одними и теми же символами ключа в соответствующих столбцах будут чаще встречаться повторяющиеся символы. Татт решил применить данный метод к найденной последовательности символов ключа немецкой машины. Однако, разумно предположив, что часть может быть проще, чем целое, он использовал не сами символы ключа, а лишь первые импульсы (биты) кодов символов (каждый символ при передаче кодировался пятью последовательными импульсами, каждый из которых мог быть одного из двух типов, обозначавшихся при письме обычно крестиками и точками; таким образом получался двоичный код длиной пять битов). К тому времени Татт уже знал, что набор символов, встречавшихся в каждой 12-й позиции ключа, содержал лишь 23 буквы, в то время как в остальных позициях были представлены 25 букв (отсутствовала только J). Предположив, что длина ключа может быть кратна 23 или 25 буквам, Татт решил попробовать ширину матрицы, равную $25 \times 23 = 575$. В столбцах полученной матрицы не было большого числа повторений, но Татт заметил, что повторения присутствовали в диагоналях. При замене ширины матрицы на 574 появились явно заметные повторения в столбцах. Понимая, что вряд ли колесо машины содержало такое большое число позиций, Татт разложил число 574 на простые множители, получив 41, 7 и 2. Попробовав период 41, он получил прямоугольник из точек и крестиков, который был переполнен повторениями[379]. Таким образом удалось понять, что одно из колёс немецкой шифровальной машины имеет 41 позицию.

В течение двух следующих месяцев Татт с коллегами установили число позиций в каждом колесе (которых всего оказалось 12) и воссоздали полную логическую структуру шифровальной машины. В начале 1942 г. Фрэнк Моррелл, сотрудник исследовательской лаборатории почтового ведомства (Post Office Research Station) в Доллис-Хилл (Dollis Hill), воплотил эту логику «в железе» в виде стойки шаговых искателей (электромеханических коммутаторов) и реле. Устройство назвали «Тунец» (Tunny), поскольку оно было аналогом называемой ими так же немецкой машины. Теперь криптоаналитикам нужно было подобрать настройки конкретного сообщения, ввести эти параметры в Tunny — и устройство выполняло расшифровку сообщения

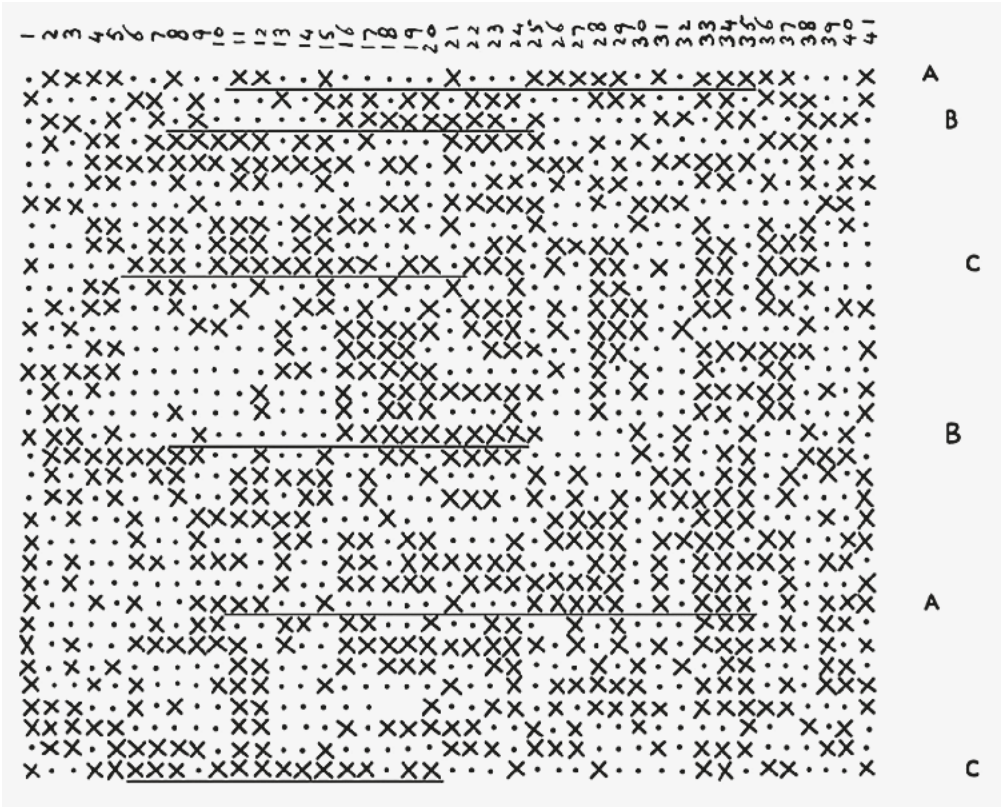


Рис. 47. Найденный Уильямом Таттом при расшифровке сообщений «Энигмы» прямоугольник из точек и крестиков со множеством повторений

(выдавая при верных настройках исходный текст на немецком языке). Однако оказалось, что подбор правильных настроек занимает около месяца. В условиях идущей войны это означало, что взлом Tunny данным путём не принесёт пользы: к моменту расшифровки сообщений они наверняка уже будут неактуальны. Криптоаналитикам срочно потребовалась более совершенная машина.

Макс Ньюман придумал, как можно частично автоматизировать задачу поиска настроек при помощи электронных устройств. Он разработал спецификацию машины, которая затем была построена инженерами из Доллис-Хилл. Логика была реализована на базе реле, но счётчики были электронными. Машина получила название «Хит Робинсон» (Heath Robinson) в честь карикатуриста, изображавшего фантастические хитроумные машины для выполнения простых задач[380].

В основу логики машины был положен метод «2 + 1», предложенный Таттом. Машина считывала последовательности символов с двух перфолент. Первая лента содержала перехваченное сообщение, вторая — последовательности из двух первых импульсов кодовых символов, соответствующих каждому

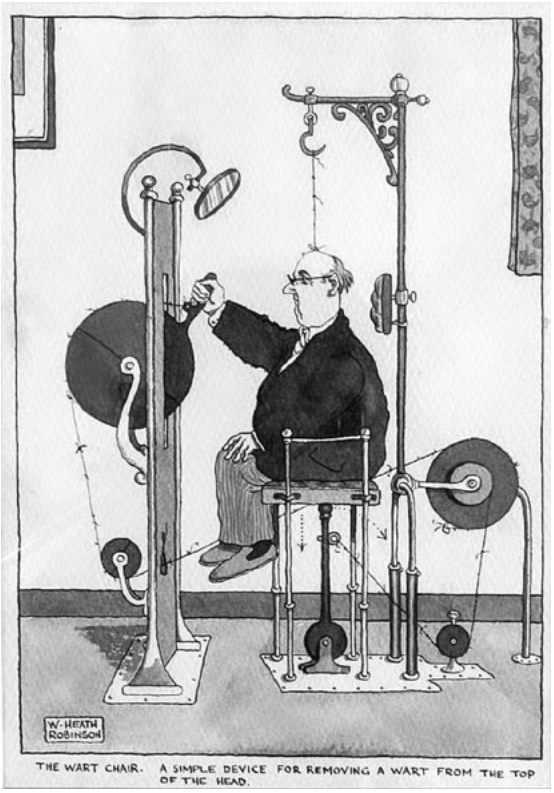


Рис. 48. Карикатура Хита Робинсона. Подпись к изображению гласит: «Бородавочный стул. Простое устройство для удаления бородавок с макушки»

из возможных сочетаний положений двух первых колёс немецкой шифровальной машины. Первое колесо, как мы уже упоминали, имело 41 возможную позицию, а второе — 31. Таким образом, длина второй ленты составляла 41 × 31 = 1271 символ. Машина просматривала все возможные наложения символов кодовой ленты на символы закодированного сообщения и оценивала каждое из этих наложений при помощи специального метода, основанного на анализе разностей импульсов, в итоге определялись наиболее вероятные позиции двух первых колёс машины. В результате этого получались сообщения с раскодированными первыми двумя импульсами каждого символа, которые передавались затем людям, занимающимся ручной дешифровкой, — эта финальная операция (восстановление пяти импульсов по двум первым) обычно была не сложнее обычной словесной головоломки[381].

Машина работала достаточно хорошо для того, чтобы показать правильность концепции Ньюмана, однако в процессе её использования обнаружился ряд технических проблем. Устройства для чтения перфолент выдавали ошибки, если на лентах возникали длинные участки последовательных отверстий или, напротив, длинные участки без отверстий. Серьёзной проблемой была синхронизация двух лент при скорости протяжки более 1000 символов в секунду — даже небольшое смещение делало весь процесс бесполезным.

В Доллис-Хилл Ньюман познакомился с Томасом Флауэрсом. Флауэрс был блестящим инженером-электронщиком; он и взялся за постройку новой машины, получившей название «Колосс» (Colossus). Флауэрс уже давал советы относительно конструкции «Хита Робинсона». Основной его вклад состоял в том, что он предложил генерировать положения колёс электронным способом в кольцевых прово́дках, устраняя таким образом одну из перфолент и избавляясь от проблемы синхронизации. Для этого требовалось огромное

количество электронных ламп; однако Флауэрс был уверен, что всю эту конструкцию можно заставить работать. *«Моё предложение, сделанное в феврале 1943 года, было встречено со значительным скептицизмом,* — писал позже Флауэрс. — *Первая реакция состояла в том, что машина с требуемым количеством ламп будет слишком ненадёжна, чтобы приносить реальную пользу. К счастью, эта критика была побеждена ссылкой на опыт почты, использующей тысячи ламп в своей сети связи. Эти лампы не подлежали перемещению или обслуживанию, а их питание никогда не отключалось. В этих условиях отказы ламп были крайне редкими».*

Разработка новой машины (позже названной Colossus Mark I) началась в марте 1943 г. «Колосс» использовал современные для 1943-го вакуумные лампы (термоэлектронные клапаны), тиратроны и фотоумножители для оптического чтения перфоленты. Машина была введена в эксплуатацию в январе 1944 г. и успешно прошла первый тест на ленте с реальным зашифрованным сообщением. «Колосс» мог обрабатывать данные со скоростью до 5000 символов в секунду благодаря тому, что лента проходила по нему со скоростью около 50 км/ч. Это позволило сократить время взлома сообщений с нескольких недель до нескольких часов, что оказалось весьма вовремя, и в результате работы машины была получена жизненно важная информация для организации успешной высадки союзников в Нормандии. Расшифрованные сообщения показали, что Гитлер проглотил дезинформацию и был уверен, что атака будет предпринята через Па-де-Кале и что танковые дивизии вермахта находятся в Бельгии.

В июне 1944 г. была разработана улучшенная версия «Колосса» под названием Mark II и было дополнительно собрано восемь машин, чтобы справиться с увеличением количества сообщений — нарушение наземных линий связи в результате действий авиации и французского движения Сопротивления вынуждало немцев использовать радиоканал более интенсивно.

Mark II содержал 2500 электроламп и 800 реле и был способен считывать данные с ленты в пять раз быстрее, чем Mark I. Этого удалось достичь благодаря комбинации параллельной обработки и буферной памяти (регистров).

После победы в войне восемь из десяти «Колоссов» в Блетчли были разобраны на месте, а два отправились в Лондон, где примерно в 1960 г. их также разобрали. Тогда же все чертежи машины были сожжены, а само её существование много лет держалось в секрете.

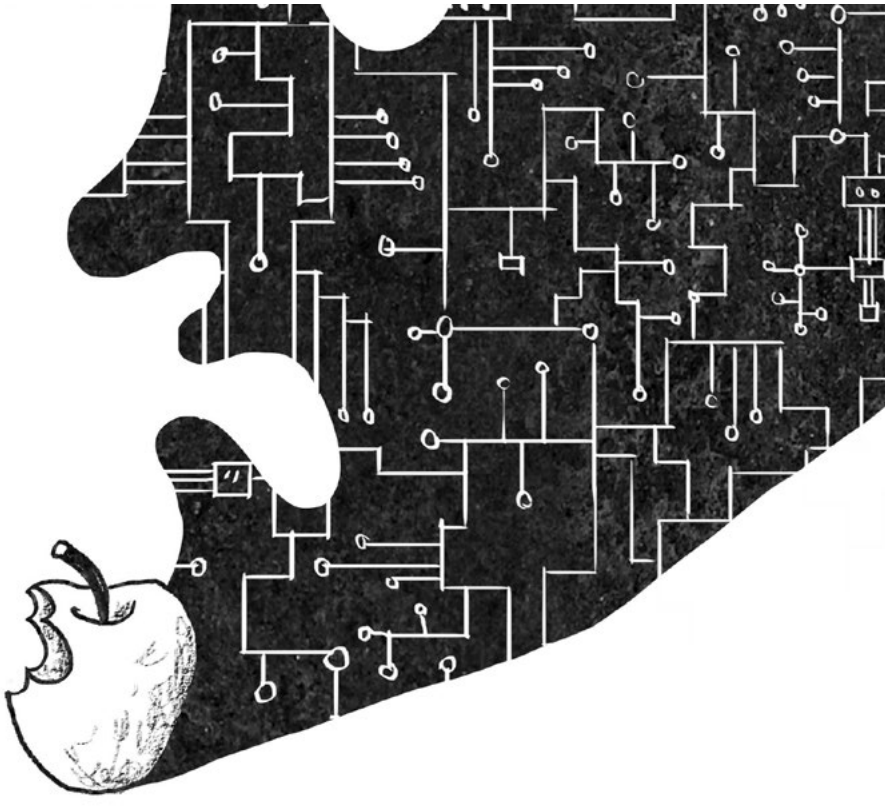
В книге мы ещё неоднократно расскажем о деятельности Алана Тьюринга. К сожалению, она оказалась недолгой — учёного постигла печальная судьба.

В 1952 г. он был обвинён в совершении «грубой непристойности» [gross indecency]. «Поправка Лабушера», принятая в 1885-м, использовалась для преследования гомосексуальных мужчин в ситуациях, когда наличие полового акта не могло быть доказано (в противном случае применялась другая, более жёсткая статья). В соответствии с «поправкой Лабушера» *«любая особа мужского пола, которая открыто или в частном порядке совершает, или участвует в совершении, или занимается либо пытается заниматься сводничеством*

для совершения любого акта грубой непристойности с какой-либо особой мужского пола, является виновной в преступлении и осуждается за него по решению суда к тюремному заключению на срок до двух лет с назначением исправительных работ или без такового». Конкретного определения «грубой непристойности» закон не содержал, что не мешало применять его против тех, чья половая жизнь не соответствовала общественным представлениям о «благопристойности»[382]. Тьюринг был признан виновным и поставлен перед непростым выбором: сесть в тюрьму или подвергнуться принудительной гормональной терапии, направленной на подавление полового влечения. Учёный выбрал последнее.

8 июня 1954 г. домработница обнаружила Алана Тьюринга мёртвым в постели, а на прикроватной тумбочке лежало надкушенное яблоко. Вскрытие показало, что причиной смерти стало отравление цианидом, а официальное расследование пришло к выводу, что учёный покончил с собой[383].

Широко распространилось мнение, что в яблоке содержался яд (хотя экспертиза яблока не проводилась). Биографы Тьюринга Эндрю Ходжес и Дэвид Ливитт предполагают, что Тьюринг воссоздал сцену из мультфильма Уолта Диснея «Белоснежка» (1937). По словам Ливитта, *«ему [Тьюрингу] особенно нравилась сцена, в которой злая королева погружает яблоко в ядовитое*



зелье»[384, 385]. Этой же версии придерживается и друг Тьюринга — писатель Алан Гарнер[386]. Молва утверждает, что именно это надкушенное яблоко изображено на логотипе компании Apple[387].

Но некоторые современные исследователи подвергают сомнению версию о самоубийстве Тьюринга, считая, что смерть случилась из-за отравления, вызванного случайным вдыханием паров синильной кислоты, которые выделялись аппаратом для гальванического золочения. Современный исследователь Джек Коупленд указывает, что гормональная терапия уже год как закончилась и учёный перенёс её бодро и даже с некоторым юмором, отнесясь к ней как к неизбежности (хотя среди последствий терапии были, в частности, импотенция и гинекомастия *[, 388, 389]). Друзья и соседи Алана отмечали, что за несколько дней до смерти он находился в хорошем настроении, без каких-либо признаков депрессии. Также учёный составил список задач, которыми планировал заняться после выходных. Мать Тьюринга тоже считала, что смерть её сына была случайностью, связанной с неаккуратным обращением с химикатами[390]. Ходжес, впрочем, полагает, что Тьюринг мог нарочно подстроить ход эксперимента таким образом, чтобы не расстраивать её[391].

Спустя более чем полвека мы вряд ли сможем достоверно установить истину, но в любом случае нельзя оправдать бесчеловечную практику преследования людей за поведение, не наносящее никому вреда.

В 1970-е первая информация об исследованиях в Блетчли-парке и о «Колоссах» начала просачиваться в публичное пространство. Профессор Брайан Рэнделл из Университета Ньюкасла начал исследование машины. Доктор Флауэрс и некоторые другие инженеры-разработчики написали в 1980-х статьи, описывающие «Колосс» в самых общих чертах.

«Колосс» не был тьюринг-полной машиной, хотя Алан Тьюринг и работал в Блетчли-парке. В то время важность полноты по Тьюрингу ещё не осознавалась в полной мере. Большинство вычислительных машин того времени также не были полными по Тьюрингу — это относится и к компьютеру Атанасова, и к Harvard Mark I, и к релейным машинам Bell Labs, созданным Джорджем Штибицем, и к первым разработкам Конрада Цузе. Несмотря на быстрый прогресс вычислительных технологий в военное время, представление о компьютере как о чём-то большем, чем просто о калькуляторе, предназначенном для решения сложных, но специфических задач, формировалось постепенно в течение долгих лет.

Благодаря реализованным в «Колоссе» параллельным вычислениям скорость машины была впечатляющей даже по сегодняшним меркам. Скорость протяжки ленты, соответствующая 5000 символов в секунду, была выбрана исключительно из соображений безопасности. Флауэрс однажды ускорил мотор, протягивающий ленту, чтобы посмотреть, что произойдёт. При скорости 9600 символов в секунду ленту разорвало на части, которые разлетелись по всей комнате со скоростью около 100 км/ч. Было решено, что 5000 символов

* Гинекомастия — увеличение размера грудных желёз у лиц мужского пола.

в секунду — это безопасная скорость. При такой скорости временной интервал между двумя рядами отверстий на ленте составляет 200 микросекунд. За это время «Колосс» способен выполнить до 100 логических операций одновременно на каждом из пяти ленточных каналов и в пятисимвольной матрице. Время задержки затвора составляет 1,2 микросекунды, что весьма впечатляюще для самых обычных электроламп.

В 1994 г. команда под руководством Тони Сэйла начала реконструкцию «Колосса» в Блетчли-парке. Машина была готова в ноябре 2007 г., и, чтобы отпраздновать завершение проекта и ознаменовать начало инициативы по сбору средств для Национального музея вычислительной техники, был организован конкурс — восстановленный «Колосс» против радиолюбителей всего мира. Задача заключалась в том, чтобы первым получить и декодировать три сообщения, зашифрованные с помощью Lorenz SZ42, переданные радиостанцией DLoHNF, расположенной в компьютерном музее Heinz Nixdorf MuseumsForum. Победителем соревнования стал радиолюбитель Йоахим Шют, который тщательно подготовился к этому событию и разработал собственную систему для обработки сигналов и расшифровки кода с использованием компьютерного языка Ada. «Колоссам» помешало желание использовать аутентичную радиоаппаратуру времён Второй мировой войны, что задержало их на один день из-за плохих условий приёма[392]. Программа Шюта, запущенная на ноутбуке с тактовой частотой 1,4 ГГц, за 46 секунд[393] нашла настройки для всех двенадцати колёс шифровальной машины. «*Мой ноутбук обрабатывал шифротекст со скоростью 1,2 миллиона символов в секунду — в 240 раз быстрее, чем „Колосс“*, — сказал Шют. — *Если вы разделите частоту процессора на этот коэффициент, то получите для „Колосса“ эквивалентную частоту, равную 5,8 МГц. Это замечательная скорость для компьютера, построенного в 1944 году*»[394].

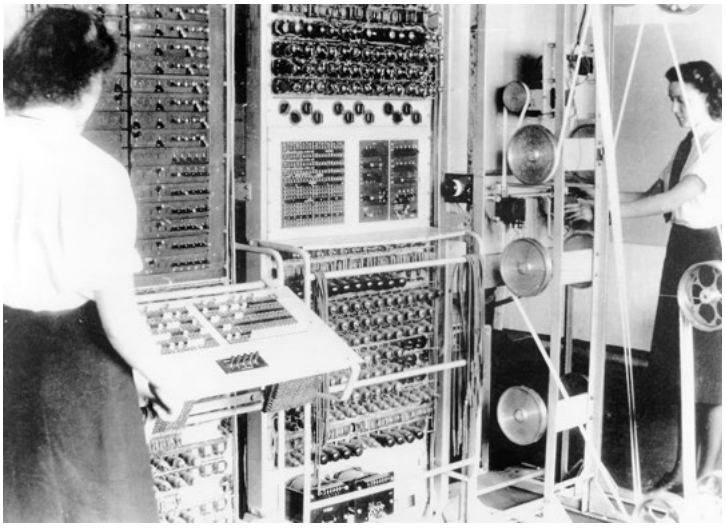


Рис. 49. Машина «Колосс»

Создатели советских ЭВМ — Сергей Лебедев и Исаак Брук

2.7.7

В 1948 г. советское руководство получило информацию об американских компьютерах ENIAC и Harvard Mark I. Было принято решение о разработке собственных ЭВМ. Решением этой задачи должны были заняться две только что созданные структуры — Институт точной механики и вычислительной техники (ИТМиВТ) и Специальное конструкторское бюро № 245 при Московском заводе счётно-аналитических машин. 4 декабря 1948 г. Государственный комитет Совета Министров СССР по внедрению передовой техники в народное хозяйство выдал члену-корреспонденту АН СССР Исааку Бруку и инженеру-конструктору Баширу Рамееву авторское свидетельство № 10475 на изобретение «Автоматическая цифровая вычислительная машина» (кстати говоря, по одной из версий, ракетные комплексы 9К720 «Искандер» позже получили своё имя именно в честь Рамеева, которого сослуживцы и военные за глаза уважительно именовали Искандерычем[395]). Брук начал собственный проект по созданию компьютера в третьем центре разработки — лаборатории электротехники Энергетического института АН СССР[396]. В общем, с самого начала программа по созданию первых советских вычислительных машин приобрела характер соревнования, и его участники взялись за работу с большим энтузиазмом.

Многое ли было известно советским специалистам о работе западных коллег? 8 января 1951 г. на заседании закрытого учёного совета институтов электротехники и теплоэнергетики АН УССР Сергей Лебедев уже после постройки своей первой вычислительной машины, отвечая на вопросы коллег, сообщил по этому поводу следующее: «*Я имею данные по 18 машинам, разработанным американцами, эти данные носят характер рекламы, без каких-либо сведений о том, как машины устроены. В вопросе постройки счётных машин мы должны догонять заграницу и должны это сделать быстро. По данным заграничной литературы, проектирование и постройка машины ведётся 5–10 лет, мы хотим осуществить постройку машины за 2 года. Показатели американских машин следующие: время умножения на ЭНИАК 5,5 мс, на ЭДВАК — 4 мс, на нашей машине 8–9 мс*»[397].

Сергей Алексеевич Лебедев родился 20 октября (2 ноября) 1902 г. в Нижнем Новгороде в семье сельского учителя Алексея Ивановича Лебедева и его жены Анастасии Петровны, преподавательницы младших классов в женском училище Гациского. Отец — Алексей Иванович Лебедев — участник народнического движения, мечтал об улучшении жизни народа путём образования и просвещения. За участие в нелегальном кружке он был арестован, провёл в тюрьме два года, после чего вышел под негласный надзор полиции с запрещением заниматься педагогической деятельностью. Впрочем, по свидетельству самого Алексея Ивановича, «негласный надзор» выражался во вполне гласном — в подозрительного вида господине в котелке и пальто горохового цвета, торчавшем у ворот его дома во всякую погоду.

В попытке скрыться от надзора полиции Алексей Иванович перебирается из родного села Роднянки сначала в Калугу, а затем в Нижний Новгород. Здесь он активно участвует в деятельности народовольческого кружка Романова и Плотникова и чудом избегает ареста во время разгрома кружка в сентябре 1896 г.

В январе 1899 г. помощник пристава Кавдин сообщил в отчёте: *«Состоящий под негласным надзором мещанин А. И. Лебедев 17 января с. г. повенчался в церкви 1-го тюремного корпуса с девицею, дворянкой, учительницей училища Гацискаго Анастасией Петровной Марьиной, 35 лет»*. До этого Алексей и Анастасия жили несколько лет в гражданском браке и решили обвенчаться в ожидании появления первого ребёнка. Один за другим у них родились четверо детей: Екатерина, Татьяна, Сергей и несколько позже — Елена. Алексей Иванович активно занимался просветительской работой: из-под его пера вышел ряд статей и книг, среди них указатель книг «Детская и народная литература» (1900), «Общедоступный словарь. Пособие по чтению газет и книг» (1906), серия из 13 «Писем» (1905–1906), отпечатанных, между прочим, тиражом в 3 млн экземпляров и распространявшихся по всей России, а также брошюра «Что читать крестьянам и рабочим? Как завести библиотеку в деревне и на фабрике?», торжественно приговорённая к сожжению решением Нижегородского окружного суда 3 марта 1911 г. Однако подобные меры не смогли остановить отчаянного энтузиаста просвещения — в 1908–1914 гг. Алексей Иванович выпускает ряд книг педагогической направленности: учебник из трёх книг («Шаг за шагом», «Букварь», «Книга для чтения в сельских школах»), пособие «Мир в картинках», трёхтомник «Школьное дело», третий том которого — «Теория и практика воспитания» — подвергается уничтожению, в этот раз по решению Учёного совета Министерства просвещения ввиду очевидной демократической направленности книги.

Детей в семье Лебедевых воспитывали вполне в соответствии с педагогическими принципами, изложенными в работах их отца. Вместо принуждения и муштры стремились убедить и заинтересовать. Вероятно, во многом благодаря этому дети выросли людьми увлечёнными и многогранными. Сестра Сергея Алексеевича — Татьяна Алексеевна, ныне больше известная по её творческому псевдониму Маврина, — стала всемирно известной художницей и единственной россиянкой, получившей международную премию Ганса Христиана Андерсена за развитие детской книги (в 1976 г.). Сегодня её работы можно увидеть в Третьяковской галерее, Русском музее, Пушкинском и в других ведущих российских музеях. Татьяна Алексеевна продолжала работать до самой глубокой старости, её рисунками иллюстрированы сотни детских книг, многие из которых есть сегодня чуть ли ни в каждом доме[398].

После революции семья Лебедевых неоднократно переезжала: Алексей Иванович занимался организацией образования в Симбирске, Курмыше, Сарапуле, преподавал в школе и на учительских курсах в Курмыше. Поскольку Алексей Иванович состоял в партии эсеров, его отношения с новой властью

складывались не всегда просто. Однако в 1920 г. он с семьёй согласился переехать в Москву по приглашению наркома просвещения Анатолия Васильевича Луначарского, чтобы активно включиться в работу Наркомпроса. Годом позже 19-летний Сергей Лебедев сдал экзамены экстерном за среднюю школу и поступил в Московское высшее техническое училище (впоследствии получившее имя Н. Э. Баумана) на электротехнический факультет.

Рис. 50. Иллюстрация Татьяны Алексеевны Мавриной к детским сказкам

После окончания института в 1928 г. Сергей Алексеевич получил приглашение стать преподавателем и одновременно был назначен младшим научным сотрудником Всесоюзного электротехнического института. В 1933 г. вышла в свет его первая монография «Устойчивость параллельной работы электрических систем» в соавторстве с Петром Сергеевичем Ждановым, принесшая Лебедеву широкую известность в академических кругах. Два года спустя ему было присвоено звание профессора, а в 1939 г., за разработку теории искусственной устойчивости энергосистем, присуждена учёная степень доктора технических наук (минуя степень кандидата).

Во время войны Лебедев занимается военными разработками: создаёт систему стабилизации для наводки танковой пушки, разрабатывает систему автоматического наведения авиационной торпеды. В 1945 г. он по приглашению президента АН УССР академика Александра Александровича Богомольца переезжает из Москвы в Киев, где возглавляет Институт энергетики АН УССР (а после разделения института становится директором Института электротехники).

Первая ЭВМ, созданная командой Лебедева, получила название «Малая электронная счётная машина», или сокращённо МЭСМ. Несмотря на слово «малая», машина насчитывала 6000 электронных ламп и с трудом умещалась в левом крыле двухэтажного здания общежития бывшего монастырского посёлка Феофания в 10 км от Киева. Перед войной в этом здании размещался филиал Киевской психиатрической больницы. После захвата Киева в 1941 г. фашисты расстреляли больных и заняли здание под госпиталь. Во время освобождения города советскими войсками здание получило серьёзные повреждения. В таком виде в 1948 г. оно досталось АН УССР и было передано Институту электротехники для размещения лаборатории. В полуразрушенном Киеве, куда АН УССР вернулась после эвакуации с Урала, других

возможностей не было. Несмотря на трудности, команде, состоявшей из двенадцати научных сотрудников (включая самого Лебедева) и пятнадцати техников и монтажниц, удалось за два года разработать, смонтировать и запустить машину. Это было действительно впечатляющим результатом. Для сравнения: в создании ENIAC, помимо тринадцати основных исполнителей, участвовало двести техников и множество рабочих.

Институт электротехники АН УССР в 1952 г. представил работу по созданию МЭСМ к Сталинской премии, хотя присуждена она так и не была. Впрочем, двумя годами ранее Лебедев уже становился лауреатом Сталинской премии третьей степени — за разработку и внедрение устройства компаун-

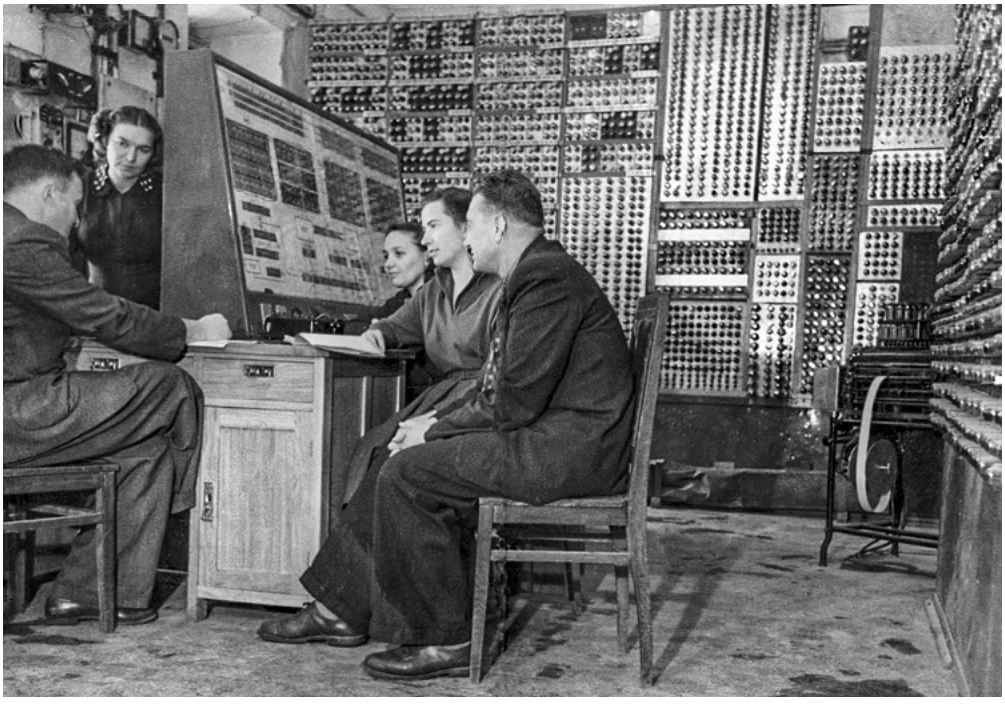


Рис. 51. Малая электронная счётная машина (МЭСМ), 1951 г.

дирования генераторов электростанций для повышения устойчивости энергосистем и улучшения работы электроустановок (под «компаундированием» или «компаундным возбуждением» понимается автоматическое регулирование магнитного потока генератора в зависимости от силы тока). Изначально МЭСМ создавалась в качестве прототипа для построения большой машины. Первое время буква М в названии означала «модель». Целью проекта была экспериментальная проверка принципов построения универсальных цифровых ЭВМ. Однако после первых успехов было принято решение доделать макет до полноценной машины, способной решать реальные задачи. В 1950 г. Лебедева пригласили в ИТМиВТ, где он возглавил создание БЭСМ-1, совершая

регулярные поездки из Киева в Москву и обратно. После сдачи БЭСМ-1 учёный занял пост директора ИТМиВТ, где впоследствии под его руководством было создано множество новых машин, начиная с ламповых и заканчивая компьютерами на интегральных микросхемах.

До недавнего времени МЭСМ считалась первой электронно-вычислительной машиной в СССР и континентальной Европе. Однако сегодня этот приоритет оспаривается. Не исключено, что машина, созданная группой Исаака Семёновича Брука, — М-1 — опередила МЭСМ. Из-за постоянных доработок, вносившихся в конструкции машин, довольно трудно определить, в какой момент каждую из них можно считать полностью функциональной. Например, утверждается, что *«первые биты информации М-1 обработала 15 декабря 1950 года, а МЭСМ — на десять дней позже, 25 декабря»*[399].

В целом история М-1 не менее увлекательна, чем история МЭСМ. Поскольку работа группы Брука в Энергетическом институте АН СССР носила инициативный характер (официальное постановление Президиума АН СССР о начале разработки машины вышло лишь 22 апреля 1950 г., то есть спустя два года после того, как был разработан первый проект машины), то лаборатория была сильно ограничена в средствах. Однако на складах института хранилось изрядное количество трофейной радиотехники: даже через несколько лет после окончания войны разобрано было далеко не всё. Брук провёл ревизию складов и нашёл миниатюрные купроксные (медно-закисные) выпрямители[400]. Таким образом, М-1 стала первым в мире компьютером, логические схемы которого были собраны на базе полупроводников*. В октябре 1951 г. М-1 работала по заданию Мосэнерго, выполняя расчёты для прогнозирования нагрузки на электросеть[401].

Исаак Семёнович Брук был сыном простого служащего табачной фабрики в Минске. Он родился 27 октября (9 ноября) 1902 г., на семь дней позже Сергея Лебедева. Хотя семья была небогата, но родители сделали всё от них зависящее для того, чтобы дети получили хорошее образование. В 1920 г. Исаак окончил реальное училище, а две его сестры — Маша и Мирра — учились в гимназии и музыкальной школе. С ранней юности Исаак интересовался техникой и был частым гостем на электромеханическом заводе «Энергия», где мастера, видя интерес мальчика, часто отдавали ему ненужные детали. Дома он превратил свою комнату в настоящую мастерскую. Мальчик много читал, рисовал, увлекался астрономией. В 1920 г. поступил на всё тот же электротехнический факультет Бауманки, куда годом позже поступит Лебедев[402]. Словом, в судьбах этих двух великих людей можно усмотреть немало совпадений.

Вообще было бы неверным считать, что советская вычислительная техника возникла в 1948 г. как чёртик из табакерки. В 1930-е гг. СССР производил собственные арифмометры и табуляторы. Так же как и на Западе, появлению электронных цифровых машин предшествовал период экспериментов с аналоговой техникой. Вот лишь некоторые важные вехи этого этапа: в 1939 г. Брук

* Впрочем, считать М-1 в полной мере полупроводниковой ЭВМ неправильно, поскольку в её схеме было также задействовано 730 электровакуумных ламп.

создаёт механический интегратор (дифференциальный анализатор), позволяющий решать дифференциальные уравнения до 6-го порядка, в 1947 г. — до 20-го порядка. В 1940-х гг. под руководством Льва Израилевича Гутенмахера начата разработка электромеханического прибора управления артиллерийским зенитным огнём и первых электронных ламповых интеграторов. Эти работы привели к созданию первых электронных аналоговых машин с повторением решения — такие машины способны не просто однократно вычислить значение некоторой функции по входным параметрам (подобно аналоговым вычислительным машинам однократного действия), а производить целые серии вычислений, запоминая результат каждой из них[403]. В 1945 г. Лебедев создал первую электронную аналоговую вычислительную машину для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений[404].

Исследования Гутенмахера не только оказали влияние на первую машину Лебедева, но также стали отправной точкой для другого интересного проекта. В 1954 г. в лаборатории Гутенмахера была создана машина ЛЭМ-1, логика которой была реализована без применения электронных ламп. Элементной базой новой машины, проект которой был представлен в 1950 г., стали двоичные феррит-диодные ячейки, представляющие собой электромагнитные бесконтактные реле на магнитных усилителях трансформаторного типа. Позже, основываясь на ячейках Гутенмахера, Николай Петрович Брусенцов разработал троичную феррит-диодную ячейку, которая работала в двухбитном троичном коде, то есть один трит записывался в два двоичных разряда. На основе этих ячеек в 1958 г. в Вычислительном центре Московского государственного университета была разработана малая ЭВМ «Сетунь». Минимальной адресуемой единицей главной памяти «Сетуни» был трайт. Один трайт равен 6 тритам (почти 9,51 бита). В «Сетуни-70» трайт интерпретируется как знаковое целое число в диапазоне от –364 до 364. В трайте может содержаться целое число как девятеричных, так и двадцатисемеричных цифр. «Сетунь» стала первой в истории цифровой машиной на базе троичной логики[405].

С позиции сегодняшнего послезнания многие решения, принимавшиеся создателями вычислительных машин до эры интегральных микросхем, могут показаться наивными или откровенно ошибочными. Такое впечатление складывается в силу того, что в развитии вычислительной техники за последние сто лет произошёл огромный прогресс, что привело к переоценке множества идей, методов и процессов. Сегодня нам кажутся очевидными многие идеи, ещё столетие назад бывшие лишь смутными мечтами людей, которых многие их современники считали чудаками. Урок, преподнесённый человечеству историей вычислительной техники, заключается в том, что даже полукустарные начинания (вспомним хотя бы постройку Цузе его первой машины), с прохладой встречаемые признанными лидерами технологического бизнеса («не подпускайте Атанасова к табулятору»), могут содержать в себе потенциал масштабных изменений, способных радикально изменить «правила игры». Конечно, здесь можно легко стать жертвой «систематической ошибки выжившего», поскольку до нас дошли только «победившие»

идеи, а огромное количество «революционных» идей новаторов на деле оказывались полной чепухой, и время экспертов, растраченное попусту на анализ этой чепухи, по всей видимости, огромно (хотя порою даже анализ чепухи приводит к появлению плодотворных идей). Однако истории известны не менее печальные случаи, когда многие идеи оказывались похоронены по причине некачественной экспертизы, ошибок управленцев и финансистов, режима секретности или недостаточного упорства самих изобретателей.

Изучение идей создателей первых вычислительных машин позволяет иначе взглянуть на некоторые «незыблемые» концепции наших дней. Парафиновые кубы и мыльные плёнки в качестве основы для вычислений, троичная логика, парадигма вычислений, основанная на сортировке карт, — все эти идеи заставляют задуматься над тем, является ли главный путь, выбранный вычислительной техникой в своём развитии, столь уж безальтернативным. Будут ли вычислительные машины будущего похожи на современные компьютеры? К этому интересному и вовсе не тривиальному вопросу мы вернёмся несколько позже. А сейчас поговорим о задачах, которые были поставлены перед электронными вычислительными машинами вскоре после их создания.

3

Машины, которые играют в игры, и игры, в которые играют машины

> Понятие игры как таковой — более высокого порядка, нежели понятие серьёзного. Ибо серьёзность стремится исключить игру, игра же с лёгкостью включает в себя серьёзность.
>
> Йохан Хёйзинга. *Homo Ludens*

Как и во всякой экспериментальной науке, специалистам, занимающимся исследованиями в области ИИ, нужна была своя «мушка дрозофила» — модельный объект, на котором можно опробовать созданные методы. В 1995 г. журнал *Time* в статье «Об озоне и фруктовых мушках», посвящённой нобелевским лауреатам 1995 года, так описывал роль, отведённую дрозофилам в современной науке: *«Для большинства людей плодовые мушки — это надоедливые насекомые, которые роятся вокруг перезрелых бананов. Однако для биологов они являются ключом к разгадке некоторых из глубочайших загадок жизни. Они почти идеальные лабораторные животные: крошечные насекомые не только быстро растут, но и их генетическая структура поразительно похожа на человеческую. Поэтому для трёх исследователей, получивших в этом году Нобелевскую премию по медицине и физиологии, было вполне естественно использовать плодовых мушек, чтобы помочь разгадать загадку того, как гены контролируют эмбриональное развитие — у насекомых и у людей»* [406, 407]. На роль плодовой мушки искусственного интеллекта настольные игры подходили идеально: мир настольной игры достаточно прост и основан на чётких и однозначно определённых законах. Создавая ИИ для игры, мы тем самым абстрагируемся от массы инженерных проблем, лежащих между ИИ и выполнением задач реального мира, нам не нужно оперировать физическими объектами, достаточно лишь формального описания игрового положения в памяти компьютера и простых средств ввода-вывода, созданных ещё на заре компьютерной эры. Настольная игра — это в некотором роде чистая игра ума, требующая от интеллектуального агента одного лишь умения принимать разумные решения в замкнутом игровом пространстве. В то же время игра претендует на то, чтобы быть, пусть и крайне упрощённой, моделью действительного мира. Ведь процесс принятия решений в ней отдалённо напоминает аналогичный процесс в реальной жизни. Неслучайно в обыденных разговорах мы часто употребляем игру как метафору для человеческих взаимоотношений: «геополитические игры», «мировая шахматная доска», «игра на понижение», «закулисные игры». Герман из пушкинской «Пиковой дамы» заявляет, что наша жизнь — игра, а популярный психолог Эрик Берн пишет книгу «Игры, в которые играют люди», посвящённую

социальным взаимодействиям людей. Игровой, игрушечный мир создан по подобию мира реального. Ребёнок, познающий мир, нередко подступается ко взрослым проблемам именно в упрощённой игровой форме, а навыки, полученные им в игре, нередко оказываются востребованы в будущем. Подобно тому как мы в игровой форме обучаем своих детей взрослой жизни, мы используем игру и для создания первых прототипов систем искусственного интеллекта, приспособленных решать задачи реального мира.

Кроме того, игра — это зрелище, понятное неспециалистам. Машина, которая умеет играть, произведёт впечатление даже на дилетанта. Такая машина способна пробудить в человеке дух соперничества, а значит, и интерес. Люди, далёкие от мира создателей «умных» машин, редко интересуются математическим аппаратом, используемым машиной для принятия решений. Но результат работы этого аппарата (ходы на шахматной или шашечной доске) может быть понятен даже ребёнку. Облекая свои достижения в понятную большинству людей форму, учёные таким образом поддерживают уверенность общества в том, что оно должно и дальше выделять ресурсы на разработку систем искусственного интеллекта.

С незапамятных времён игры становились мишенью для критики со стороны моралистов. *«Тавлеи и шахы въ многихъ насъ ωбртаѣми соуть, а книги ни въ кого же»* («Многие из нас только и знают, что играть в тавлеи и шахматы, а книг никто не читает»)[408] — написано в «Пчеле» (Μέλισσα) — сборнике назидательных изречений IX в. византийского происхождения, получившем весьма широкое распространение на Руси и Балканах. История, впрочем, показала, что моралистам не под силу истребить игры, а сами игры могут принести немалую пользу науке.

Хотя теория игр оформилась в самостоятельную дисциплину лишь в XX в., учёные уже успели придумать весьма развитую систему классификации, позволяющую разделять игры на различные типы в зависимости от их существенных особенностей.

В первую очередь все игры подразделяются на *кооперативные (коалиционные)* и *некооперативные.* В первых игроки объединяются в группы и обязаны соблюдать определённые обязательства перед другими игроками своей группы. В некооперативных играх каждый действует за себя (это не значит, что в процессе игры не могут формироваться союзы или что невозможна координация действий игроков, однако в некооперативных играх следование договорённостям не является обязательным). Можно сказать, что ключевой отличительной чертой некооперативных игр является отсутствие внешнего механизма (например, правил), обеспечивающего неукоснительное следование установленным обязательствам. В соответствии с этим подразделением футбол и бридж — кооперативные игры, а крестики-нолики и шахматы — некооперативные.

Также игры делятся на *симметричные* и *асимметричные*. В симметричных играх игроки обладают одинаковым набором возможностей (стратегий) и одна и та же стратегия обеспечивает одинаковый результат каждому из игроков.

Например, в игре «камень, ножницы, бумага» каждый из игроков может показать и камень, и ножницы, и бумагу, но, скажем, ножницы всегда побеждают бумагу, вне зависимости от того, какой из игроков их показал — первый или второй. Пример асимметричной игры — прятки, в них у игроков и водящего разные наборы возможностей. Некоторые игры, например шахматы или шашки, иногда называют «почти симметричными», потому что в них существует небольшая разница между белыми и чёрными — белые ходят первыми.

Игры также делят на *параллельные* и *последовательные*. В параллельных играх игроки совершают свои ходы одновременно либо не осведомлены о выборе оппонента до тех пор, пока остальные не сделают свои ходы. В последовательных, или динамических, играх участники совершают ходы последовательно и в момент совершения хода обладают информацией о предшествующих действиях других игроков, хотя эта информация может быть и неполной. Уже упомянутая игра «камень, ножницы, бумага» — параллельная (ведь игроки действуют одновременно), а крестики-нолики — последовательная. В повседневной жизни, рассуждая о компьютерных играх, мы часто называем последовательные игры пошаговыми, а параллельные — играми реального времени.

Игры относятся к классу игр *с нулевой суммой*, если сумма возможных выигрышей игроков равна нулю. Например, если вы играете в орлянку, сумма вашего выигрыша всегда равна сумме проигрыша оппонента, и наоборот, то есть если вы выиграли, например, десять копеек, то ваш оппонент эти десять копеек проиграл или можно сказать, что он выиграл минус десять копеек. В сумме же ваши выигрыши дают ноль. В шахматах наблюдается точно такая же ситуация: если вы выиграли, то ваш противник проиграл, и наоборот, то есть вы с противником не можете выиграть одновременно. Если выигрышу соответствует единица, проигрышу — минус единица, а ничьей — ноль, то сумма результатов в партии всегда будет равна нулю. Игры с нулевой суммой являются частным случаем игр *с постоянной суммой*. Например, если вы играете в орлянку в казино, которое в каждом раунде изымает в свою пользу половину выигрыша, то раунд такой орлянки будет игрой с постоянной, но не нулевой суммой. На другом полюсе данной классификации находятся игры *с непостоянной суммой*, в которых стороны могут одновременно выиграть или одновременно проиграть, — например игры, в которых игроки могут сотрудничать, стремясь достичь общей цели. К этому классу игр также обычно относятся игры с одним игроком (в принципе, игру с непостоянной суммой можно представить в виде игры с нулевой суммой при помощи введения дополнительного, фиктивного игрока — например, если в версии орлянки с казино мы будем рассматривать казино как ещё одного игрока, то получим игру с нулевой суммой).

Игры подразделяются также на игры *с полной информацией*, в которых все игроки осведомлены обо всех возможных стратегиях игры друг друга и о том, каким будет результат игры для любой комбинации стратегий сторон. В противном случае игра относится к классу игр *с неполной информацией*.

Игры с полной (complete) информацией не следует путать с играми *с совершенной информацией* (perfect), отличительной особенностью которых является тот факт, что игрокам известны все ходы друг друга (а также иные изменения состояния игры, например поступление на руки карт в результате сдачи) с момента начала игры. Если это не так, игра является игрой *с несовершенной информацией*. Для того чтобы лучше понять принципиальное различие двух последних способов классификации игры, приведём два примера.

В качестве примера игры с полной, но несовершенной информацией можно привести преферанс: каждый из игроков знает заранее условия выигрыша или проигрыша и может рассчитать сумму выплат каждого из сидящих за карточным столом для любой разыгранной партии, поэтому это игра с полной информацией. Однако игроки не знают, какие карты были сброшены противником в прикуп, а также какие карты были получены при сдаче, пока они ещё не раскрыты, поэтому это игра с несовершенной информацией.

Пример игры с неполной, но совершенной информацией — «Брейн-ринг»: команды осведомлены обо всех ответах, данных соперниками в предыдущих раундах (поэтому это игра с совершенной информацией), однако обычно не знают заранее правильного ответа на вопрос текущего раунда и, стало быть, не знают, каким будет результат игры в случае тех или иных действий команд (поэтому это игра с неполной информацией).

Существуют и другие способы разделения игр на классы, но мы не будем далее углубляться в этот вопрос. Итак, наша жизнь — игра. Игра некооперативная, асимметричная, параллельная, с непостоянной суммой, с неполной и несовершенной информацией.

3.1 Ним и ниматрон

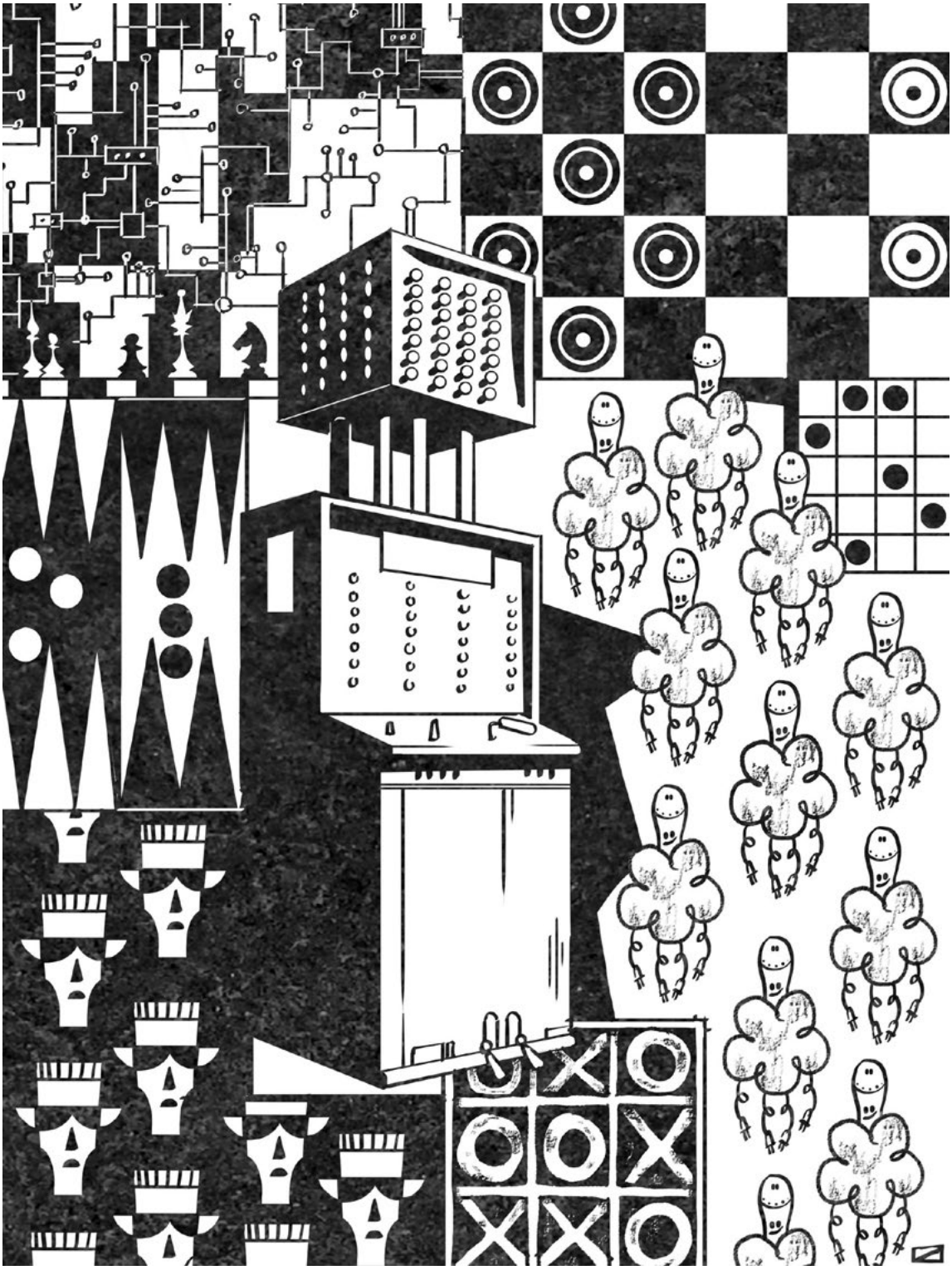
— Пари, что год моего рождения, умноженный на два, даёт чётное число.

Том Стоппард. *Розенкранц и Гильденстерн мертвы**

При игре в ним два игрока по очереди берут предметы, разложенные на несколько кучек (обычно на три). За один ход можно взять любое количество предметов (больше нуля) из любой кучки. Выигрывает игрок, взявший последний предмет. В древние времена, когда люди ещё пользовались спичками, для игры в ним обычно использовали кучки из спичек. В принципе, для нима подходят любые предметы — монетки, камешки, пуговицы, золотые слитки 999-й пробы. Для особых ценителей существуют даже специальные наборы для игры в ним, но выпускают их на всякий случай ограниченными сериями.

Различные разновидности этой игры известны с древних времён. По одной из существующих версий, она возникла в Китае, поскольку очень похожа на китайскую игру «сбор камней» (捡 石子, jiǎn-shízi, цзяньшицзы)[409], но это не точно[410]. Самые ранние европейские упоминания нима относятся к началу XVI в. Однако его современное название придумано на рубеже XIX–XX вв. математиком Чарльзом Бутоном из Гарвардского университета, который в 1901–1902 гг. разработал математическую теорию этой игры[411]. Это стало одним из первых случаев создания теории игры в истории математики. Вся теория вместе с описанием правил игры занимает всего пять страниц текста. Хотя Бутон и создал математическую теорию игры, он так и не дал объяснения тому, почему было выбрано такое странное название. Некоторые исследователи полагают, что название было образовано от немецкого глагола *nehmen* или от староанглийского *nim*, имеющих значение «брать». По другой версии, название было получено путём переворота букв английского глагола *win* («побеждать»). Несложно заметить, что игра в ним — некооперативная, симметричная, последовательная, с нулевой суммой, с полной и совершенной информацией. Трудно представить себе что-нибудь более простое. Неудивительно, что именно такие игры первыми стали подвластны машинам.

* Пер. И. Бродского.



На Всемирной выставке в Нью-Йорке в 1940 г. компания Westinghouse Electric представила двух роботов — Elektro и Sparko, а также машину под названием «Ниматрон» (Nimatron), способную играть в ним.

Главным конструктором машины был американский физик-ядерщик Эдвард Кондон, который с 1937 г. занимал в Westinghouse Electric позицию заместителя директора по исследованиям[412]. Идея сделать машину для игры в ним пришла к Кондону, когда он понял, что пересчётные схемы, которые используются в счётчиках Гейгера, можно применить для представления чисел, описывающих состояния игры[413]. Кондон разработал и собрал «Ниматрон» зимой 1939/40 года с помощью своих ассистентов — Джерельда Тоуни и Уилларда Дерра. 26 апреля 1940 г. он подал заявку на получение патента на устройство, который был выдан 24 сентября того же года[414].

Масса машины, логика которой была основана на электромеханических реле, составляла более тонны[415]. На передней панели «Ниматрона» располагалось четыре столбца по семь ламп. Игрок, делая ход, мог погасить одну или несколько ламп в одном из рядов, после чего очередь хода переходила к машине. Если «Ниматрон» проигрывал партию, то выдавал игроку жетон с надписью *NimChamp* (Чемпион по ниму).

Первая версия машины совершала свои ходы моментально — по оценке Кондона, на выбор хода у «Ниматрона» уходило менее одной сотой доли секунды. Но такое поведение механического соперника слишком пугало игроков, и разработчики решили добавить в схемы замедляющие цепи. Таким образом, машина делала вид, что в течение нескольких секунд обдумывает ход. По мнению Кондона, это был первый в истории случай намеренного замедления работы компьютера[416].

«Ниматрон» всегда выбирал оптимальные ходы, но разработчики решили всегда предоставлять право первого хода человеку, а в качестве стартовой позиции выбиралась одна из девяти заложенных в память машины позиций, в которых игрок, делающий ход первым, при правильной игре выходил победителем. Когда кто-нибудь из посетителей, раздосадованных проигрышем, заявлял, что машину обыграть невозможно, операторы стенда показывали, как это можно сделать[417]. За время выставки в игру сыграло не менее 50 000 человек, из которых около 90% не смогли выиграть у «Ниматрона»[418].

В последний раз машина участвовала в выставке в 1942 г. в Нью-Йорке, затем «Ниматрон» был перемещён в научные коллекции Планетария в Питтсбурге (штат Пенсильвания), где какое-то время демонстрировался публике[419], после чего следы машины теряются.

«Ниматрон» был одной из первых в мире машин, способных играть в игру, иногда его даже называют первой в мире компьютерной игрой. Это, по всей видимости, действительно так, если не принимать в расчёт «шахматного игрока» (El Ajedrecista), о котором мы расскажем несколько позже.

Несмотря на этот успех «Ниматрона», Кондон считал его одним из самых больших провалов в своей карьере — ведь он не смог увидеть весь потенциал машины: *«Это было как минимум за четыре или пять лет до Джонни*

фон Неймана, Эккерта, Мокли и всего этого цифрового компьютерного бизнеса, и [я] ни разу не подумал об этом всерьёз; я просто думал об этом как о забавной штуке, но схемы и всё прочее были точь-в-точь такими же, как позже в компьютерах, программируемых компьютерах». В итоге влияние «Ниматрона» на цифровые компьютеры и компьютерные игры оказалось незначительным[420].

Вслед на «Ниматроном» было создано множество других машин для игры в ним. В 1948 г. Реймонд Редхеффер представил машину массой менее 2,5 кг. По словам Редхеффера, её конструкция была разработана им в 1941–1942 гг.[421] Несколько лет спустя компания Ferranti, занимающаяся разработкой электротехнического и военного электронного оборудования, создала первый цифровой компьютер, предназначенный для игры в ним, — «Нимрод» (The Nimrod). Он был представлен на Британском фестивале (научная выставка) в мае 1951 г., а затем на Берлинской торговой ярмарке (промышленная выставка) в октябре того же года. На этих выставках «Нимрод» произвёл настоящий фурор. Многие очевидцы рассказывали, что наибольшее впечатление производила не игра с «Нимродом», а наблюдение за мигающими огнями, которые должны были отражать мыслительную деятельность машины. Чтобы контролировать гигантскую толпу зрителей, организаторы выставки даже были вынуждены обратиться за помощью к полиции[422].

Рис. 52. «Ниматрон»

В 1943 г. Кондон присоединился к Манхэттенскому проекту, но через полтора месяца подал в отставку из-за конфликтов по поводу безопасности с генералом Лесли Гровсом, военным руководителем проекта.

С августа 1943 г. по февраль 1945 г. Кондон работал консультантом в Беркли в рамках проекта по разделению урана-235 и урана-238. В 1944 г. был избран в Национальную академию наук. После войны Кондон приложил много усилий в борьбе за установление гражданского контроля над атомной энергией, выступил за международное сотрудничество учёных и вступил в «Американо-советское научное

общество». В 1945 г. президент Трумэн назначил Кондона на пост директора Национального бюро стандартов США (ныне известного как NIST — National Institute of Standards and Technology, Национальный институт стандартов и технологий). В 1946 г. Кондон был избран президентом Американского физического общества.

Благонадёжность Кондона неоднократно подвергалась сомнениям со стороны властей. 29 мая 1946 г. директор ФБР Гувер написал президенту Трумэну письмо, в котором среди прочего заявил, что Кондон — *«не кто иной, как шпионский агент под прикрытием»*[423]. Среди тех, кто защищал Кондона от нападок, были Альберт Эйнштейн и Гарольд Юри. После того как в 1951 г. Кондону удалось доказать свою невиновность в ходе очередной процедуры проверки, он по собственной инициативе покинул правительство, чтобы стать руководителем отдела исследований и разработок компании Corning Glass Works. Спустя годы Карл Саган так пересказал рассказ Кондона об одной из встреч с комиссией по проверке лояльности. Один из членов комиссии выразил обеспокоенность: *«Доктор Кондон, здесь говорится, что вы были в авангарде революционного движения в области физики под названием… квантовая механика. Это вызывает у нас опасения в том, что если вы были в авангарде одного революционного движения… то могли бы быть и на переднем крае другого»*[424]. В частных разговорах Кондон формулировал свою позицию так: *«Я присоединяюсь к каждой организации, которая, по моему мнению, имеет благородные цели. Я не спрашиваю, состоят ли в ней коммунисты»*[425].

С 1966 по 1968 г. Кондон руководил «Проектом НЛО» (UFO Project) в Боулдере, известным под названием «Комитет Кондона». В заключительном отчёте проекта был сделан вывод о том, что наблюдения неопознанных летающих объектов имели вполне прозаические объяснения[426].

Вот так порой потянешь за ниточку рассказа о бесхитростной математической игре, и тут на тебя внезапно вывалятся атомные технологии, квантовая механика, шпионы, коммунисты и инопланетяне.

3.2 Крестики-нолики

Есть и такая, где каждый выводит по трое шашек,
А побеждает, кто смог в линию выстроить их.
Много есть игр, и надо их знать красавице умной,
Надо играть: за игрой часто родится любовь.

Овидий Публий Назон. *Наука любви*

Несмотря на исключительную математическую простоту нима, эта игра всё-таки не слишком популярна. Если вы попросите случайного человека назвать вам самую простую настольную игру, то, скорее всего, первой игрой, которая придёт ему в голову, будут крестики-нолики.

Из популярных источников[427, 428] можно узнать, что ранний вариант этой игры, носивший название «по три камешка» (Terni lapilli), был распространён в Древнем Риме примерно с I в. до н. э. Начало старинной игры ничем не отличалось от современного варианта: игроки последовательно выставляли свои фишки на поле размером 3 × 3 (при этом первый ход в центр поля был запрещён), а если кому-то из них удавалось выстроить их в ряд, то он выигрывал партию. Однако после того, как три фишки каждого цвета были выставлены на доску, начинался второй этап игры, в ходе которого игроки могли поочерёдно перемещать одну из своих фишек на любое незанятое соседнее поле, при этом критерий выигрыша оставался неизменным — нужно было построить три фишки в ряд. Размеченные поля для игры (их называли *tabula lusoria* — доска для игры) встречаются на всей бывшей территории Римской империи.

Крестики-нолики… Казалось бы, что может быть проще? Но если задаться вопросом, откуда взялась эта игра, то можно нечаянно открыть портал в другие миры.

Например, в английской «Википедии» написано, что игра появилась в Древнем Египте, называются даже примерные даты: *«Игры на полях типа „три-в-ряд“ могут быть отслежены вплоть до Древнего Египта, где поля для таких игр были обнаружены на черепице (?), датированной примерно 1300 годом до н. э.»*[429]. При этом в качестве источника приводится ссылка на пару научно-популярных книг. Причём источники отчасти лишь добавляют путаницы, потому что в книге Марлы Паркер говорится о том, что поля для игры найдены на черепице древнеегипетского храма, построенного 3300 лет назад[430], в то время как в книге Клавдии Заславски говорится уже о плитах из

песчаника[431]. Но чёрт с ним, будем считать, что плиты из песчаника — это такая суровая ~~челябинская~~ древнеегипетская черепица, главное, Заславски называет сам храм — Поминальный храм Сéти I, который посвящён второму фараону XIX династии, отцу Рамсеса II. Храм расположен в Фиванском некрополе в Верхнем Египте, через реку напротив Луксора, возле деревни Курна. Древнеегипетское название этого храма — Великий храм Мен-Маат-Ра Сети в доме Амона в западной части Фив. Кроме того, Заславски сообщает, что открытие было сделано более ста лет назад при изучении учёными потолка храма. Эта информация позволяет отследить источник сведений вплоть до книги британского инженера Генри Паркера, впервые вышедшей в свет в 1909 г. Сама книга посвящена, впрочем, вовсе не Египту, а истории Цейлона (ныне — Шри-Ланки). В книге Паркер приводит 34 пиктограммы, обнаруженные на крыше храма в Курне. Он приходит к выводу, что три из них были нанесены на плиту до того, как она стала частью строения, поскольку они обрываются на краях плиты, что, по мнению Паркера, означает, что плита была укорочена во время строительства и вместе с отпиленной частью были удалены края изображений. Также Паркер считает весьма вероятным, что оставшаяся 31 пиктограмма тоже была нанесена на плиту строителями храма. Паркер предполагает, что одна из пиктограмм (судя по описанию — № 10) является полем для игры, подобной современным крестикам-ноликам[432].

Является ли гипотеза Паркера, содержащая целый ряд допущений, достаточным основанием для того, чтобы считать, что древние египтяне знали игру, похожую на крестики-нолики, особенно учитывая то, что египтологам до сих пор не удалось отыскать ни одного упоминания этой игры или хотя бы изображения, подобного указанному Паркером?.. Отмечу, что о древнеегипетских настольных играх мы знаем не так уж мало. Например, «древнеегипетские шахматы» (сенет) встречаются и на изображениях в гробницах и удостоены упоминания в древнеегипетских текстах; более того, до нас даже дошло несколько древних комплектов для игры в сенет.

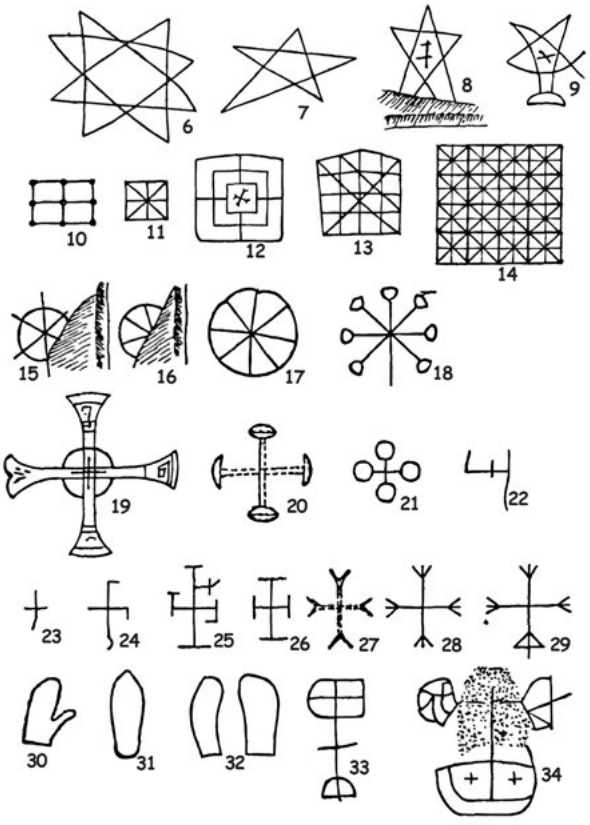


Рис. 53. Пиктограммы, обнаруженные на крыше храма в Курне

Гипотеза Паркера перекочевала затем в книгу Харольда Мюррея, посвящённую исследованию истории настольных игр (в своей книге Мюррей приводит 7 из 34 пиктограмм из книги Паркера)[433], а затем в работы Роберта Белла[434], признанного специалиста в этой области, откуда уже, по всей видимости, проникла в качестве установленной истины в научно-популярные книги, а оттуда — в «Википедию».

В наши дни предположение Паркера о том, что все пиктограммы, найденные на крыше храма в Курне, были нанесены на неё до его постройки, подвергается серьёзному сомнению: как минимум часть символов имеет коптское происхождение, поэтому датировка пиктограмм сегодня представляется неопределённой[435]. Египет в разное время находился под властью персов, греков, римлян, византийцев, арабов, и определить точно, к какой эпохе относятся граффити, сегодня вряд ли возможно[436].

В 1990-е гг. исследовательская группа GERSAR (Groupe d'Études, de Recherches et de Sauvegarde de l'Art Rupestre, Группа изучения, исследования и защиты наскального искусства) под руководством доктора Кристиана Вагнёра составила каталог из более чем тысячи изображений, напоминающих поля для игр типа «три в ряд»[437].

Если существование игры, подобной крестикам-ноликам, в Древнем Египте поставлено под вопрос, то можем ли мы быть уверены в том, что игра была знакома жителям Древнего Рима?

И тут всё не так плохо: есть письменный источник. Это, как ни странно, «Наука любви» (Ars Amatoria) Публия Овидия Назона — своеобразная древнеримская «Камасутра» начала I в. (не исключено, что в ссылку на Черноморское побережье Дакии Овидий угодил именно как автор этого «развратного» произведения). В ней Овидий советует девушкам научиться играть в различные игры, чтобы очаровывать мужчин. Правда, перечисляя эти игры, описанию каждой он отводит всего по одной-две строки. В написанных позже «Скорбных элегиях» он вновь упоминает игру с тремя фишками, но и здесь ограничивается парой строк, почти дословно повторяющих сказанное в «Науке любви». О самой игре из этих двух текстов понятно только, что у игроков есть по три фишки и их нужно выстроить в ряд на доске. При этом на территории, принадлежавшей Римской империи, найдено множество полей для такой игры, но их надёжная датировка затруднена. К счастью, одно такое поле нанесли на черепицу до обжига, и на той же черепице находится печать XXX легиона, что позволяет говорить о времени создания поля — не ранее 196 г. до н. э.

Однако некоторые неточности в отношении древнеримской версии игры всё-таки проникли в популярную литературу. Во-первых, Овидий нигде не приводит названия игры. Название *Terni Lapilli* — условное и используется для обозначения игры сегодня лишь потому, что Овидий упоминает три камешка (фишки). Из-за того что у Овидия не говорится о названии игры, её часто называют просто — «игра Овидия»[438]. Во-вторых, Овидий говорит о поле для игры *tabella*, а не использует термин *tabula lusoria*, который вообще

применялся обычно к столикам для азартных игр[439]. Ну и, наконец, вишенка на торте — современная реконструкция игры основана в большей мере на современных правилах похожих игр, потому что единственное, что мы знаем из Овидия: в игре следовало выстроить три фишки в ряд[440].

Сегодня игру, правила которой аналогичны «реконструированным правилам» Terni Lapilli, называют «трёхфишечной мельницей» [Three men's morris], при этом в стандартную мельницу играют девятью фишками на доске из 24 полей. Только в английском у «мельницы» как минимум десять названий: *nine-man morris, mill, mills, the mill game, merels, merrills, merelles, marelles, morelles* и *ninepenny marl.*

Мюррей приводит ещё одну разновидность игры на поле 3 × 3 — в ней, после того как все фишки выставлены на доску, ходы осуществляются необязательно на соседние клетки, вместо этого фишка может быть перемещена на любую свободную клетку. Мюррей называет такой вариант игры «девять дырок» [nine holes][441]. В Гане распространена игра под названием «ачи» (achi), она похожа на «трёхфишечную мельницу», но у каждого игрока не три фишки, а четыре[442].

Но вернёмся к обычным крестикам-ноликам. В 1799 г. игра в крестики-нолики упоминается в белом стихе английского поэта «Озёрной школы» Уильяма Вордсворта, впрочем без указания названия игры:

Каких только не знали вы забот
И не чурались их! Однако ж были
У вас и праздники, и торжества,
И радости простые: вечерами,
Собравшись у каминного огня,
Как часто мы над грифельной доской
Склонялись низко друг напротив друга
И крестики чертили и нули
В баталиях упорных — впрочем, вряд ли
Их удостою описанья здесь *, [443].

Первая печатная ссылка на английское название игры — *noughts and crosses* (nought — альтернативное слово для обозначения нуля) — появилась в 1858 г. в выпуске журнала «Записки и запросы». В статье, подписанной «A. De Morgan», обсуждается возможность исчисления шахматной игры. Автор вспоминает игру, в которую играли его однокашники и которую одни называли *noughts and crosses*, а другие — *tit-tat-toe* (это были слова победителя в игре, подобно словам «шах и мат» в шахматах)[444]. Несложно догадаться, что подпись «A. De Morgan» принадлежит уже упоминавшемуся нами шотландскому математику и логику Огастесу де Моргану, благодаря жене которого, Софии Элизабет де Морган, мы знаем подробности одного из первых визитов Ады Лавлейс к Чарльзу Бэббиджу.

* Пер. Татьяны Стамовой.

Считается, что первая печатная ссылка на игру с названием, похожим на современное американское *tic-tac-toe*, — *tick-tack-toe* — появилась в 1884 г., но тогда это слово обозначало игру, в которую играют на грифельной доске и которая состоит из попыток с закрытыми глазами попасть карандашом по одному из множества чисел, при этом число, на которое попал карандаш, становится числом очков в игре. Не исключено, что название *tic-tac-toe* происходит от названия старинной версии нардов — *tick-tack*. Считается также, что американское переименование *noughts and crosses* в *tic-tac-toe* произошло уже в XX в.[445], однако, по-моему, *tic-tac-toe* — это простое фонетическое искажение упомянутого де Морганом *tit-tat-toe*.

Де Морган не был единственным мыслителем своего времени, задумавшимся над проблемой исчисления настольных игр. Автобиография Чарльза Бэббиджа, вышедшая в 1864 г., проливает свет на подробности проекта по строительству машины, способной играть в крестики-нолики.

Первоначально Бэббидж занимался задачей с философской точки зрения, исследуя вопрос, можно ли построить машину, способную играть в шахматы, шашки или крестики-нолики (Бэббидж использовал термин *tit-tat-to*). Сделав вывод о том, что это возможно, Бэббидж разработал алгоритм перебора всех возможных вариантов, с помощью которого машина могла бы выбирать наилучшие ходы. Кроме того, он пришёл к выводу, что его аналитическая машина вполне способна выполнять все необходимые для этого действия: *«Весь вопрос о создании автомата, способного играть в любую игру, зависит от способности машины представлять все мириады комбинаций, связанных с ней. Допустив по сто ходов каждой из сторон в самой длинной партии в шахматы, я обнаружил, что число возможных комбинаций в аналитической машине во много раз превосходит все необходимые требования»*.

Затем Бэббидж сосредоточил усилия на самой простой из рассмотренных им игр. Он подсчитал количество ходов в игре и изучил вопрос о том, каким образом автомат может выполнять необходимые расчёты. После того как Бэббидж пришёл к выводу о возможности создания такой машины, он понял, что доходы, полученные от неё, можно использовать для финансирования более серьёзного проекта — аналитической машины. Однако после подробного анализа вопроса Бэббидж решил, что прогнозируемая прибыль будет слишком низкой, чтобы даже в случае финансового успеха компенсировать время и деньги, затраченные на разработку и производство автомата.

Записи Бэббиджа об автомате для игры в крестики-нолики датируются с 25 сентября 1844 г. по 24 октября 1868 г., причём большая часть работы над механизмами системы и алгоритмами принятия решений была завершена к концу 1848 г. Алгоритм поиска выигрышных ходов был полностью завершён к октябрю 1860 г.[446] Однако реальная машина, способная играть в крестики-нолики, появилась лишь спустя почти сто лет — в 1950 г. Джозеф Кейтс создал для Канадской национальной выставки в Торонто «Берти Мозг» (Bertie the Brain) — машину четырёхметровой высоты, имевшую несколько

уровней сложности и призванную продемонстрировать возможности аддитрона (additron) — новой миниатюрной версии радиолампы[447]. Спустя два года Александр Дуглас создал OXO — реализацию крестиков-ноликов для компьютера EDSAC (Electronic Delay Storage Automatic Calculator) с графическим выводом на 6-дюймовую электронно-лучевую трубку. OXO стала, по всей видимости, первой игрой, разработанной для компьютера общего назначения[448].

С вычислительной точки зрения крестики-нолики представляют собой довольно простую задачу. Несложно прикинуть количество возможных позиций в игре: каждое из полей доски, состоящей из девяти клеток, может быть пустым либо содержать крестик или нолик. Таким образом, у нас есть девять полей, для каждого из которых существует три возможных состояния, следовательно, общее число позиций составляет $3^9 = 19\,683$. Однако данное число включает в себя множество невозможных позиций, например позицию с пятью крестиками и без единого нолика. Более точный подсчёт позволяет сократить это число до 5478, а с учётом идентичности всех возможных поворотов и отражений остаётся лишь 765 действительно различных позиций.

Простая оценка верхней границы количества различных партий даёт нам $9! = 362\,880$ (первый ход можно сделать на одну из девяти свободных клеток, второй — на одну из оставшихся восьми и т. д.). Это число включает в себя некорректные игры, в которых ходы продолжались уже после победы одной из сторон. За вычетом таких ситуаций игр остаётся 255 168, а удаляя отражения и повороты, получаем всего 26 830 возможных партий. Даже для ранних ламповых компьютеров полный перебор такого количества вариантов не представлял большой сложности, то есть машина могла рассмотреть в любой позиции все возможные варианты продолжения игры и выбрать ход, который обеспечивает наилучший для машины результат даже при идеальной игре противника.

В 1960 г. Дональд Мичи разработал программу, получившую название «Спичечнокоробочный обучающийся движок для крестиков-ноликов» (Matchbox Educable Noughts And Crosses Engine, MENACE; слово *menace* по-английски значит «угроза»). Эта программа была способна обучиться идеальной игре в крестики-нолики и для своего выполнения не требовала такого дефицитного ресурса, как компьютер. Вместо него Мичи использовал набор из трёх сотен спичечных коробков, каждый из которых соответствовал уникальному состоянию доски. Спичечные коробки были заполнены цветными бусинками, соответствующими отдельным ходам. Количество шариков каждого цвета указывало на «уверенность» в том, что соответствующий ход является наилучшим. В зависимости от результата каждой сыгранной партии производилось изменение количества бусинок в коробках, соответствующих возникшим в игре позициям, в результате чего программа постепенно всё более уверенно выбирала правильные ходы[449]. В статье Мичи, посвящённой MENACE, впервые был введён термин «обучение с подкреплением» [reinforcement learning][450].

Простота крестиков-ноликов сделала эту игру популярным модельным объектом на заре развития электронных вычислительных машин. В наши дни анализ этой игры удобен в педагогических целях: при помощи крестиков-ноликов удобно иллюстрировать многие положения классической теории игр, а создание программы, способной играть в эту игру, — неплохое упражнение для начинающих разработчиков систем искусственного интеллекта.

3.3 Играть на уровне бога: от Цермело до «Ломоносова» (первое отступление)

Двух операторов била нервная дрожь. Тысячелетия ожидания прошли не впустую.
— Он действительно существует? — выдохнул Хвуудт.
— Он действительно существует, — подтвердил Глубокомысленный.
— Главный Ответ? На Главный Вопрос Жизни, Вселенной, и Всего Такого?
— Да.
Обоих обучали и специально готовили к этому моменту, вся их жизнь была подготовкой к нему, они ещё при рождении были выбраны, чтобы стать свидетелями Ответа, и всё равно они не могли сдержать радостных восклицаний. Они хлопали друг друга по плечам, и веселились, как дети.
— И ты готов выдать его нам? — успокоившись, спросил Колнгкилл.
— Готов.
— Сейчас?
— Сейчас.
Оба оператора облизали сухие губы.
— Хотя я не думаю, — добавил компьютер, — что он вам понравится.
— Неважно! — сказал Хвуудт. — Мы должны знать его! Сейчас же!
— Сейчас? — переспросил Глубокомысленный.
— Да! Сейчас!
— Отлично, — сказал компьютер и снова погрузился в молчание. Хвуудт и Колнгкилл трепетали. Напряжение становилось невыносимым.
— Серьёзно, он вам не понравится, — заметил Глубокомысленный.
— Говори!
— Отлично, — сказал компьютер. — Ответ на Главный Вопрос…
— Ну…!
— Жизни, Вселенной, и Всего Такого…, — продолжал компьютер.
— Ну…!!!
— Это… — сказал Глубокомысленный и сделал многозначительную паузу.
— Ну…!!!!!!
— Сорок два, — сказал Глубокомысленный с неподражаемым спокойствием и величием.

Дуглас Адамс. *Путеводитель хитч-хайкера по Галактике* *

* Пер. В. Филиппова.

3.3.1 Основоположник теории игр Эрнст Цермело

Серьёзный разговор о теории игр обычно не обходится без упоминания немецкого математика Эрнста Цермело и его теоремы. Цермело в жизни сопутствовала научная удача: его именем названо сразу две теоремы, первая из них — одна из фундаментальных теорем теории множеств — называется также теоремой о полном упорядочении; вторая, доказанная в 1913 г., стала первой формальной теоремой теории игр.

В современной литературе по теории игр даются различные формулировки этой теоремы[451]. Некоторые авторы утверждают, что Цермело доказал, что шахматы являются детерминированной (т. е. лишённой элемента случайности) игрой, например: *«В шахматах либо белые могут добиться форсированной победы, либо чёрные могут добиться форсированной победы, либо обе стороны могут форсировать ничью»*[452, 453, 454].

Другие делают более общие утверждения, называя их теоремой Цермело, например: *«В каждой конечной игре с полной информацией имеется строгое стратегическое равновесие Нэша, которое может быть найдено при помощи*

обратной индукции. Более того, если ни у одного из игроков нет одинаковых результатов в двух произвольных конечных узлах, то существует уникальное равновесие Нэша, которое может быть найдено таким образом»[455]. Равновесием Нэша называется ситуация, в которой ни один участник не может увеличить выигрыш, изменив свою стратегию, если другие участники своих стратегий не меняют. Авторов не смущает, что Джон Нэш родился спустя 15 лет после доказательства теоремы Цермело.

Некоторые вообще утверждают, что белые не могут проиграть: *«…в конечной игре существует стратегия, следуя которой игрок, первым осуществляющий ход… может избежать поражения, но неизвестно, существует ли стратегия, следуя которой он может победить»*[456].

Кроме того, многие авторы указывают, что методом доказательства, использованным Цермело, была обратная индукция, например: *«Цермело использовал этот метод ещё в 1912 году для анализа шахмат. Он начинает с конца игры и затем движется к её началу. По этой причине данную технику иногда называют обратной индукцией»*[457].

Несмотря на большой интерес к теории игр, в англоязычной литературе распространилась путаница в отношении того, в чём именно заключался вклад Цермело, равно как и вклад некоторых других ранних теоретиков. Как это ни странно, проблема возникла, по всей видимости, из-за языкового барьера: многие ранние работы по теории игр были написаны на немецком и не переводились на английский. Например, оригинальная работа Цермело под названием «О применении теории множеств к теории шахмат» (Über eine Anwendung der Mengenlehre auf die Theorie des Schachspiels)[458], увидевшая свет в 1913 г., не была переведена на английский вплоть до 1997 г. Также не была своевременно переведена на английский менее известная, но связанная работа Денеша Кёнига, написанная в 1927 г.[459] Вторая статья, связанная с работой Цермело, была написана Ласло Кальмаром в 1928–1929 гг.[460, 461], но на английский язык её перевели только в 1997 г. До работы Швальбе и Уокера «Цермело и ранняя история теории игр» (Zermelo and the Early History of Game Theory)[462], написанной в 1997 г., по всей видимости, существовал только один корректный анализ работы Цермело — в статье Николая Воробьёва «Управляемые процессы и теория игр» (1955). Проблема в том, что эта книга переводилась только на немецкий язык (1975) и была недоступна англоязычному читателю. Со времён книги Воробьёва в русскоязычной литературе бытовало корректное описание вклада Цермело: *«Цермело доказал детерминизм игр, подобных шахматам, и то, что рациональные игроки могут, используя полную информацию, разработать оптимальную стратегию игры»*. Вот как звучит вопрос, задаваемый Цермело в его статье: *«Можно ли определить объективную оценку произвольной позиции в игре, а также наилучший возможный ход <…> или по крайней мере определить их математически объективно, без необходимости ссылаться на субъективные психологические понятия, такие как „идеальный игрок“ и тому подобное?»*

Прежде чем продолжить рассуждения о вкладе Цермело, давайте рассмотрим вопрос о максимальной длине шахматной партии. Хотя сегодня шахматы уже не столь популярны, как в 1980-е, основные правила этой игры знакомы едва ли не каждому — худо-бедно почти все мы в детстве освоили, что конь ходит «буквой Г» и что пешки не ходят назад. Однако в шахматах есть правила, о которых знает не каждый любитель. Например, установленное Международной шахматной федерацией (FIDE, от французского *Fédération Internationale des Échecs*) правило пятидесяти ходов гласит, что если в течение пятидесяти ходов ни одна пешка не двинулась вперёд и ни одна фигура не была взята, то в партии присуждается ничья по требованию любого из игроков. Также любой из игроков вправе потребовать присуждения ничьей в случае как минимум троекратного повторения одной и той же позиции. Благодаря правилу пятидесяти ходов ни одна из сторон не может вопреки воле другой стороны затянуть шахматную партию до бесконечности — для того чтобы она не завершилась в соответствии с вышеуказанным правилом, каждые пятьдесят ходов должно происходить хотя бы одно взятие фигуры или движение вперёд пешки и, кроме этого, позиции не должны повторяться. Весьма остроумные подсчёты показывают, что при таких условиях партия не может продолжаться больше примерно 6000 ходов[463]. В теории игроки могут отказаться от требования ничьей, несмотря на повторение позиции или превышение границы, установленной правилом пятидесяти ходов. Специально для таких случаев (в общем-то, сугубо теоретических) в 2014 г. FIDE установила специальное правило, в соответствии с которым при достижении порога в 75 ходов без взятий и движений пешек ничья присуждается автоматически. Словом, в современных шахматах есть такие тонкости, которые известны не многим. Цермело же рассматривал версию игры, в которой бесконечные партии были теоретически возможны.

Цермело задаётся двумя вопросами: во-первых, что означает, что игрок находится в «выигрышной» позиции, и можно ли это определить объективным математическим способом? Во-вторых, если он находится в выигрышной позиции, можно ли определить количество ходов, необходимых для форсированного выигрыша, то есть такого выигрыша, которому противник не может воспрепятствовать?

Чтобы дать ответ на первый вопрос, Цермело утверждает, что необходимым и достаточным условием является непустота определённого множества, содержащего все возможные последовательности ходов, такие, что игрок (например, играющий белыми фигурами) выигрывает независимо от того, как играет другой игрок. Но если это множество будет пустым, лучшее, чего сможет достичь игрок, — это ничья. Аналогичным образом Цермело определяет и другое множество, содержащее все возможные последовательности ходов, такие, что игрок может отложить своё поражение на бесконечное количество ходов, что подразумевает ничью. Это множество также может быть пустым, то есть игрок может отсрочить поражение только на конечное число ходов

в случае, если его противник действует правильно. Однако последнее равносильно тому, что противник может добиться победы. Возможность того, что оба набора будут пустыми, означает, что белые не могут гарантировать, что они не проиграют.

Впрочем, первый вопрос представлял лишь незначительный интерес для Цермело. Его гораздо больше интересовал второй — о количестве ходов, необходимом для победы в «выигрышной позиции». Цермело приходит к выводу, что максимально необходимое для победы число ходов не превышает числа возможных позиций в игре. Он использует доказательство от противного: предположим, что число ходов, необходимое белым для победы, превышает число возможных позиций. Тогда как минимум одна выигрышная позиция будет в процессе выполнения этой последовательности ходов возникать на доске дважды. Следовательно, белые могли бы при первом возникновении этой позиции совершить тот же ход, что и во втором случае, и таким образом достичь победы за число ходов, не превышающее количества возможных позиций.

Метод обратной индукции 3.3.2

Часто приписываемый Цермело метод обратной индукции был впервые описан в 1944 г. в монографии Джона фон Неймана и Оскара Моргенштерна «Теория игр и экономическое поведение» [Theory of Games and Economic Behavior][464], сегодня считающейся одной из основополагающих работ в области теории игр.

Значимость работ Джона фон Неймана для вычислительной техники трудно переоценить. Наверняка вы слышали, что архитектуру большинства современных компьютеров часто называют архитектурой фон Неймана (мы ещё вернёмся к этому термину позже), а сами компьютеры — фон-неймановскими машинами. Кроме того, фон Нейман заложил основы математического аппарата квантовой механики, внёс существенный вклад в теорию операторов (его именем назван особый вид алгебр — алгебры фон Неймана), предложил теорию клеточных автоматов, а также стал одним из ключевых участников Манхэттенского проекта. В 1970 г. Международный астрономический союз присвоил имя Джона фон Неймана кратеру на обратной стороне Луны. В его память учреждены следующие награды: медаль Джона фон Неймана, Теоретическая премия фон Неймана, «Лекция Джона фон Неймана».

Кем же был этот человек со звучной немецкой фамилией?

Янош Лайош Нейман родился в 1903 г. и был старшим из трёх сыновей в состоятельной еврейской будапештской семье. Его отец, Микса Нейман, переселился в Будапешт из маленького городка Печ в конце 1880-х гг. Он получил степень доктора юриспруденции и работал юристом в Венгерском ипотечно-кредитном банке (Magyar Jelzálog-Hitelbank). Мать Яноша, Маргарет Канн,

была домохозяйкой и старшей дочерью коммерсанта Якоба Канна — партнёра в фирме Kann — Heller, торговавшей сельхозоборудованием[465].

Янош с детства проявлял признаки одарённости: в шесть лет он мог делить в уме восьмизначные числа, складывать фразы на древнегреческом, в восемь — уже неплохо разбирался в математическом анализе.

Дела Миксы Неймана шли довольно неплохо — основатель и глава банка Кальман Селль в 1899 г. получил пост премьер-министра Венгрии и хотя и пробыл на нём относительно недолго (до 1903 г.), но впоследствии сохранял видную позицию в венгерской элите.

В 1913 г. старшему Нейману был пожалован дворянский титул с правом наследования. Таким образом Янош получил дополнение к своему имени в виде символа знатности. Теперь его имя звучало по-австрийски как Янош фон Нейман, а по-венгерски как Нейман Маргиттаи Янош Лайош *. Когда позже фон Нейман преподавал в Берлине и Гамбурге, его называли Иоганн фон Нейман. После переезда в 1930-х гг. в США его имя изменилось на английский манер — Джон. Забавно, что братья фон Неймана, оказавшись в США, получили совсем другие фамилии: Vonneumann и Newman.

Джон Харсаньи, венгерский эмигрант и представитель следующего поколения исследователей теории игр, хотя лично и не знал фон Неймана, но был хорошо знаком с обществом, из которого он вышел. Согласно Харсаньи, фон Нейман всегда использовал приставку «фон» к фамилии и его задевало, если кто-то опускал её. Более того, фон Нейман настаивал на том, что если предложение начиналось с его фамилии, то вы не должны были использовать заглавную букву в слове «фон», поскольку изменение первоначального написания недопустимо. Это, конечно, было весьма незначительной человеческой слабостью[466].

фон Нейман получил степень доктора философии по математике в Будапештском университете в 1926 г. Параллельно он изучал химические технологии в Швейцарской высшей технической школе Цюриха. Отец Яноша считал, что профессия математика не сможет обеспечить сыну надёжное будущее. В 1927 г. фон Нейман был назначен приват-доцентом Берлинского университета, став самым молодым обладателем этой степени в истории университета. Первую половину 1929/30 учебного года он провёл на должности приват-доцента в Гамбурге[467].

В 1930 г. фон Нейман был приглашён на преподавательскую позицию в Принстонский университет, а далее, с 1933 г. и до самой смерти, занимал профессорскую должность в уже знакомом нам Институте перспективных исследований (IAS)[468].

В межвоенные годы многие европейские евреи эмигрировали в США, среди них был ряд венгерских учёных: помимо фон Неймана в США перебрались Теодор фон Карман, Пол Халмош, Юджин Вигнер, Эдвард Теллер, Дьёрдь

* Маргиттаи означает «из Маргиты», а окончание *–i* — типичное окончание, используемое при образовании венгерских дворянских имён от названия местности; но семья Неймана не имела никакого отношения к городу Маргита, фамилию старший Нейман, по всей видимости, избрал по имени жены, а на выбранном гербе были изображены три маргаритки на зелёном поле.

Пойа, Денеш Габор и Пал Эрдёш, многие из них затем приняли участие в разработке ядерного оружия. Современники отмечали, что венгерские учёные обладали развитым интеллектом, говорили на необычном языке, а их родиной была сравнительно небольшая страна. В результате их стали в шутку называть марсианами, что сами учёные приняли с должным чувством юмора.

В соответствии с шуточной легендой венгерские учёные были потомками разведывательных сил Марса, которые якобы приземлились в Будапеште на рубеже XIX–XX вв. и от которых женщины зачали детей. Вскоре марсиане, посчитав планету непригодной для исследований и жизни, оставили Землю. Родившиеся якобы от марсиан дети позднее уехали в Америку.

Дьёрдь Маркс в книге «Прибытие марсиан» (A marslakók érkezése) писал:

— …Вселенная — огромная, содержит мириады звёзд, и многие из них не слишком отличаются от нашего Солнца. Вокруг многих из этих звёзд, возможно, вращаются планеты. Какая-то часть этих планет содержит жидкую воду на своей поверхности и газообразную атмосферу. Исходящая от звезды энергия приводит к синтезу органических веществ, превращает океан в тонкий слой тёплого супа. Эти химические вещества соединяются друг с другом и создают систему самопроизводства. Простейшие живые организмы размножаются, эволюционируют в ходе естественного отбора и становятся более сложными, пока не появятся по-настоящему мыслящие существа. Далее последуют цивилизация,

наука и технология. И в поисках новых миров они отправятся на соседние планеты, а затем планеты у соседних звёзд. И они расселятся по всей галактике. И эти исключительно развитые люди уж точно не проглядят такое прекрасное место, как наша Земля. Итак, — Ферми подошёл к решающему вопросу, — если всё это произошло, то они уже наверняка прибыли сюда. Так где же они?

Именно Лео Силард, человек с отличным чувством юмора, дал идеальный ответ парадоксу Ферми:

— Они среди нас, — ответил он, — но называют себя венграми.

Итак, фон Нейман и Моргенштерн дали формальное математическое определение обратной индукции (заметим, что они не использовали этот термин как таковой, а говорили лишь об индукции и последовательном рассмотрении позиций игры в обратном порядке — от тривиальных к нетривиальным). Сам термин «обратная индукция» периодически использовался математиками и ранее[469], но современное его применение в качестве обозначения процедуры, предложенной фон Нейманом и Моргенштерном, начинает утверждаться только в начале 1950-х в работах отца динамического программирования Ричарда Беллмана[470].

В современной терминологии обратной индукцией называют метод нахождения оптимальной последовательности действий в игре, основанный на обратной хронологии: сначала определяется оптимальное действие на последнем шаге, затем на предпоследнем и так далее, а в последнюю очередь устанавливается то действие, которое нужно совершить в начале игры. В шахматах такой способ исследования позиции обычно называют ретроспективным (или ретроградным) анализом или же просто ретроанализом. Ещё до появления формального обоснования обратной индукции ретроанализ был отдельным жанром шахматной композиции, где для решения обычно необходимо восстановить ходы, которые привели к возникновению заданной позиции.

Методология динамического программирования, позволяющая машинам осуществлять ретроспективный анализ игр, была создана Беллманом в 1965 г.[471] Публикация Беллмана стала итогом его работы, о которой сообщалось ещё четырьмя годами ранее[472]. Беллман полагал, что рано или поздно появятся машины, способные, применяя его метод, найти полное вычислительное решение задачи оптимальной игры для шашек, в отношении же шахмат он считал, что удастся получить точные решения для некоторых классов окончаний — например для чисто пешечных эндшпилей[473].

Давайте рассмотрим пример применения метода ретроспективного анализа к такой простой игре, как крестики-нолики.

1. Для начала мы перечислим все возможные позиции и присвоим каждой из них неопределённую оценку, поскольку мы пока не знаем, какие из них являются выигрышными, проигрышными или ничейными. Затем присвоим оценку тем позициям, в которых на доске присутствует три

крестика в ряд, — эти позиции выиграны крестиками, и мы с чистой совестью можем присвоить им соответствующую оценку, равную 1 (единицей мы будем обозначать победу крестиков). Аналогичную операцию проделаем с позициями, в которых в ряд выстроились три нолика, — этим, выигранным ноликами позициям мы присвоим оценку –1 (минус единица будет соответствовать позициям, выигранным ноликами). Затем настаёт очередь очевидно ничейных позиций, то есть таких позиций, в которых не осталось ни одного свободного поля, но при этом отсутствуют выстроившиеся в ряд по три крестики и нолики. Оценку таких позиций назначим равной 0, что будет соответствовать ничьей.

2. Теперь рассмотрим множество позиций с неопределённой оценкой, в которых очередь хода за крестиками и существует хотя бы один ход, ведущий в позицию с оценкой 1. Оценкой для таких позиций тоже становится единица: то есть позиции, в которых у крестиков есть хотя бы один ход, ведущий в выигрышную для них позицию, являются для них тоже выигрышными.

3. Аналогично для позиций с очередью хода, принадлежащей ноликам, имеющих неопределённую оценку, при наличии у ноликов хотя бы одного хода, ведущего в позицию с оценкой –1, устанавливаем оценку, равную –1.

4. Рассмотрим теперь позиции, для которых все возможные ходы приводят в позиции с определённой оценкой. Для таких позиций выберем оценку, соответствующую лучшему из возможных исходов для стороны, которой принадлежит очередь хода. То есть если очередь хода принадлежит крестикам и у них есть ход, ведущий в ничейную позицию, то оценкой позиции является 0, в противном случае (т. е. если все ходы ведут к проигрышным позициям) оценкой позиции становится –1. Если же очередь хода за ноликами и у них есть ход, ведущий в ничейную позицию, то оценкой позиции становится 0, в противном же случае — 1.

5. Если на шагах 2–4 была получена хотя бы одна новая оценка, возвращаемся к шагу 2.

Таким образом, мы, начав с финальных позиций игры, постепенно перемещаемся в направлении её начальной позиции, присваивая по пути оценки позициям промежуточным. Именно из-за этого движения задом наперёд метод называется ретроспективным анализом.

Работу алгоритмов удобно рассматривать в графической форме, используя представление игры в виде древовидной структуры, в которой узлы соответствуют позициям в игре, а ветви — возможным ходам. Алгоритм начинает работу с установления оценки для нижних (терминальных) узлов дерева, а затем постепенно поднимается вверх, пока не достигает корневого узла — начальной позиции игры.

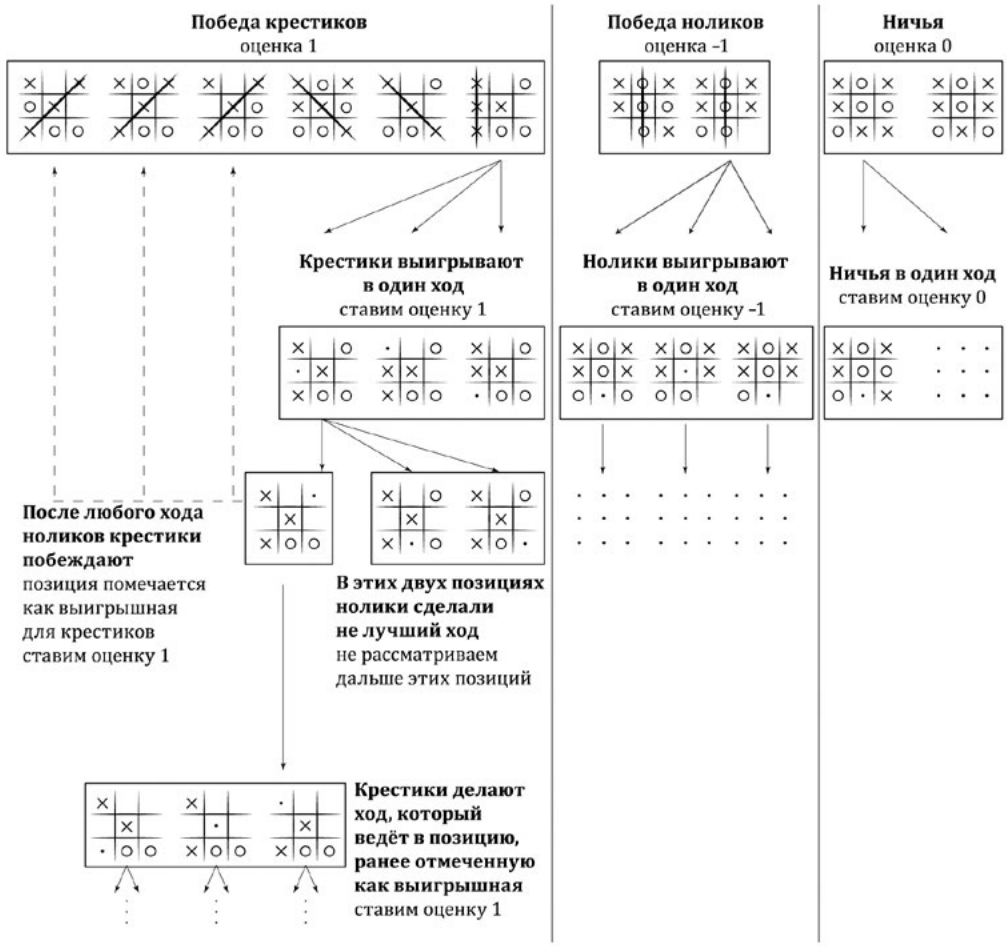


Рис. 54. Метод ретроспективного анализа в применении к игре крестики-нолики

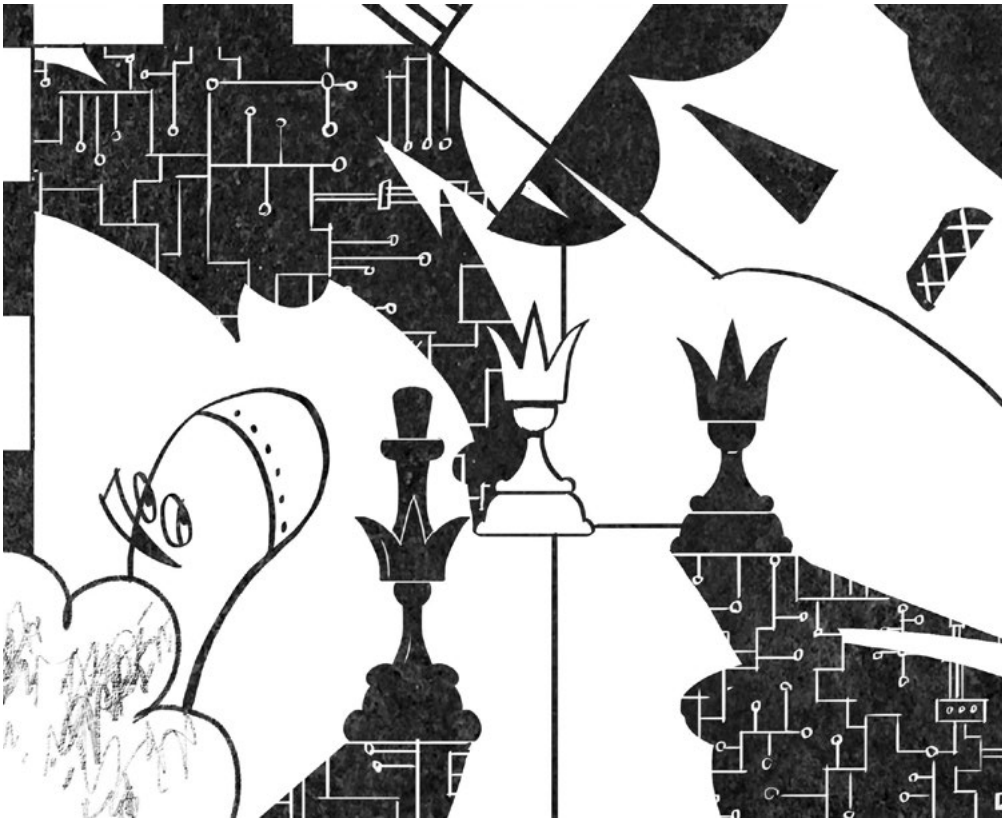
Если игра, подобно описанной Цермело версии шахмат, допускает достижение ничьей при помощи бесконечных последовательностей ходов, то описанный нами алгоритм по завершении работы оставит оценку для таких позиций неопределённой и нам достаточно будет просто заменить неопределённые оценки на нули, соответствующие ничьей, чтобы иметь определённые оценки для всех игровых позиций.

Получив точные оценки для всех позиций игры, мы можем использовать их для того, чтобы в любой позиции совершать идеальный ход. Достаточно просто просмотреть список всех возможных ходов в текущей позиции и выбрать тот, который ведёт в позицию с наилучшей для нас оценкой.

Таким образом мы и получаем введённые ранее Цермело заполненные множества последовательностей ходов.

Применение обратной индукции для анализа шахматных окончаний 3.3.3

В 1969 г. в СССР математики Александр Брудно и Игорь Ландау применили ретроанализ для решения шахматной задачи под названием «Неприкосновенный король». В задаче на доске три фигуры: белый король, белый ферзь и чёрный король. Белый король находится на поле c3 и не имеет права двигаться (поэтому и называется неприкосновенным). Вопрос заключается в том, может ли белый ферзь с помощью своего неприкосновенного короля заматовать одинокого короля чёрных. Эта задача была известна ещё в XIX в., и многие шахматисты, в том числе гроссмейстеры, ошибочно предполагали, что заматовать короля нельзя. Брудно и Ландау выяснили с помощью машины, что мат даётся при любом начальном положении белого ферзя и чёрного короля, причём не позднее двадцать третьего хода. Они также доказали, что белые побеждают только в том случае, если «неприкосновенный король» в задаче стоит на полях c3, c6, f3 или f6. Вполне вероятно, что это был первый случай в истории шахмат (и математики), когда вычислительная машина решила шахматную задачу раньше человека[474, 475].



В 1970 г. математик Томас Штрохлейн защитил диссертацию о компьютерном анализе шахматных окончаний[476]. Когда на шахматной доске остаётся мало фигур, задача нахождения оптимальных ходов становится вычислимой. В 1969 г. Штрохлейн выполнил ряд расчётов на компьютере AEG-Telefunken TR4 в Вычислительном центре им. Лейбница в Мюнхене (Leibniz-Rechenzentrum München, сегодня это учреждение обычно называют Суперкомпьютерным центром им. Лейбница), проанализировав такие окончания, как «король и ферзь против короля» (KQK), «король и ладья против короля» (KRK), «король и пешка против короля» (KPK), «король и ферзь против короля и ладьи» (KQKR), «король и ладья против короля и слона» (KRKB) и «король и ладья против короля и коня» (KRKN)[477]. Это традиционно считается первым случаем практического применения ретроспективного анализа для шахматных окончаний[478].

В 1970-е гг. сотрудники Института проблем управления АН СССР Эдуард Комиссарчик и Арон Футер осуществили машинный анализ эндшпиля «король, пешка, ферзь против короля и ферзя» (с белой пешкой, фиксированной на поле g7)[479], а также эндшпиля «король, пешка, ладья против короля и ладьи» (KRPKR)[480, 481].

Именно работу по анализу последнего эндшпиля я вспоминаю, когда смотрю очередную серию анимационного сериала Netflix «Любовь, смерть и роботы» (Love, Death & Robots), и вот почему. В 2007 г. свет увидела книга Дэвида Леви с похожим названием — «Любовь и секс с роботами» (Love and Sex with Robots)[482]. Леви также выступает в качестве организатора скандально известной одноимённой ежегодной конференции (loveandsexwithrobots.org), проведение которой в 2015 г. было сорвано из-за запрета властей Малайзии. Дэвид Леви весьма яркая личность в мире ИИ. Например, он руководил разработкой и финансировал создание чат-ботов, становившихся победителями премии Лёбнера в 1997-м (Converse) и 2008-м (Do-much-more). Леви возглавляет Международную ассоциацию компьютерных игр (International Computer Games Association, ICGA), созданную в 1977 г. как Международная ассоциация компьютерных шахмат (International Computer Chess Association, ICCA). Леви сам является международным мастером спорта по шахматам, победителем чемпионата Шотландии по шахматам (1968-го, в 1975-м разделил первое место со Стивеном Суонсоном), а в 1972 г. играл на первой доске за команду Шотландии на Шахматной олимпиаде в Скопье. Как видите, мы совсем близко, до искомого эндшпиля уже практически рукой подать.

Кроме игры в шахматы и очевидного интереса к теме ИИ, Дэвид Леви также является заядлым спорщиком.

В 1968 г. Леви и Джон Маккарти, один из пионеров шахматного программирования (и автор термина «искусственный интеллект», о чём мы упоминали в начале книги), встретились на вечеринке, устроенной Дональдом Мичи. Маккарти пригласил Леви сыграть в шахматы — и последний одержал победу. Маккарти прокомментировал эту победу словами: *«Вы можете победить меня, но через десять лет появится компьютерная программа, которая*

3.3.3

Применение обратной индукции для анализа шахматных окончаний

сможет победить вас». Леви предложил заключить пари, и Маккарти согласился. Спорщики поставили по 500 фунтов, это была более чем внушительная сумма, эквивалентная примерно 14 000 долларов 2023-го[483]. По признанию самого Леви, в то время он зарабатывал 895 фунтов в год[484]. Позже ставка более чем удвоилась, когда к ней присоединились Дональд Мичи, Сеймур Пейперт из Массачусетского технологического института и Эд Коздровицкий из Калифорнийского университета в Дейвисе.

Забегая вперёд, скажем, что Леви одержал победу в этом пари, выиграв в последующие годы несколько матчей против различных программ (Chess 4.5, Каиссы и MacHack), включая решающий матч 1978 г. против программы Chess 4.7 в Торонто[485, 486], а в 1984 г. Леви выиграл вторую, на этот раз пятилетнюю ставку в пари против разработчиков программы Cray Blitz[487].

Но вернёмся назад, когда исход этого пари ещё был неясен, а Леви не прекращал спорить.

В 1973 г. во время Северо-Американского чемпионата по шахматам среди компьютерных программ (North American Computer Chess Championship, NACCC), организованного Ассоциацией вычислительной техники (Association for Computing Machinery, ACM) в Атланте, Леви поспорил с создателями программы CHAOS, которые выразили сомнение в его заявлении о том, что в течение года они не смогут запрограммировать компьютер для правильной игры в окончании «король и ладья с пешкой против короля и ладьи» так, чтобы машина всегда была способна выиграть, находясь в выигрышной позиции, и никогда не проигрывала в ничейной. Сумма пари составила 100 долларов, и спустя год, в ноябре 1974 г., Леви получил деньги, поскольку программисты признали, что задача оказалась слишком сложной для них.

Однако удача не всегда способствовала Леви, и как минимум одно знаменитое пари он проиграл. Этот спор в истории компьютерных шахмат носит название «Скотч против водки» (Scotch versus Vodka). Как пишет сам Леви, «будучи довольно жадным», он решил повторить успех пари с создателями CHAOS и в декабре 1974 г., находясь в Москве, заключил аналогичное пари с Владимиром Арлазаровым: в случае поражения Леви должен был подарить Арлазарову двенадцать бутылок скотча, а в случае победы Леви должно было достаться двенадцать бутылок водки. Примерно через год спор завершился победой Арлазарова, под началом которого как раз и работали Комиссарчик и Футер, успешно решившие упомянутое окончание при помощи программы, использующей метод ретроспективного анализа[488, 489].

Ещё одна беседа спорщика Леви имела неожиданные последствия. В составе команды разработчиков другой шахматной программы — Belle — в чемпионате 1974 г. участвовал Кен Томпсон, сегодня больше известный как создатель операционной системы Unix (совместно с Деннисом Ритчи), языка программирования Би, ставшего предшественником Си, а также кодировки UTF8. Томпсон вспоминает: *«…после игр мы разговаривали в баре, и он [Леви] утверждал, что „компьютеры не могут играть эндшпили, даже простые, и они никогда не смогут“. Он сказал: „Я эксперт в окончании «ладья и пешка*

против ладьи», и компьютер никогда не сможет играть этот эндшпиль". В тот вечер я пошёл в свою комнату, произвёл расчёты и пришёл к выводу, что задача вычислима, что вы можете получить решение этой игры, решить её с помощью иного механизма, понимаете, не с помощью обычных [алгоритмов] компьютерных шахмат, а совсем другим способом. Вы можете просто получить ответ, посмотреть его и составить таблицу правильных ходов. Вернувшись на следующий день, я сказал ему [Леви] об этом, на что он ответил „не-не, это потребует слишком большого числа полуходов, вы знаете", на что я сказал „нет, это не зависит от числа полуходов, это другой метод", но он ответил „о нет", он просто отмахнулся от меня, и я, знаете, не просто разозлился, это не то слово, я… знаете… знаете… я пошёл домой и около десяти лет посвятил эндшпилям»[490].

История успехов Томпсона в области компьютерного анализа шахматных окончаний началась, как это ни странно, ещё с одного знаменитого спора.

Альфред Шейнволд, всемирно известный эксперт по бриджу, в одной из своих статей упоминает несколько ценных советов, которые он получил от отца в юности. *«Сын!* — говорил старший Шейнволд. — *Однажды ты встретишь незнакомца, который предложит тебе поспорить на пять долларов, что он сможет заставить пикового вальта выпрыгнуть из колоды и пустить струю пива тебе в ухо. Сын, не спорь с ним, потому что если ты сделаешь это, то получишь полное ухо пива»* *. К глубокому его сожалению, гроссмейстер Уолтер Браун, по всей видимости, игнорировал мудрость предков, поэтому получил струю условного пива в своё условное ухо. Браун позарился на 100 долларов, предложенные Томпсоном за победу над машиной в окончании «король и ферзь против короля и ладьи». Несмотря на два с половиной часа, выделенных на обдумывание, и целых пятьдесят ходов, гроссмейстер не смог выполнить задание и был вынужден заплатить. Казалось бы, какая ерунда, любой учебник шахматных окончаний рассказывает, как выиграть с ферзём против ладьи. Это действительно так, при правильной игре сильнейшая сторона гарантированно добивается победы, но оказалось, что это окончание намного сложнее, чем кто-либо мог предположить.

Свои результаты по анализу эндшпиля «ладья и король против ферзя и короля» Томпсон представил в 1977 г. на конференции Международной федерации по обработке информации. Помимо пари с Брауном, Томпсон провёл несколько показательных выступлений. Против программы пытались играть Ханс Берлинер, экс-чемпион мира по переписке, и Лоуренс Дей, чемпион Канады. Ни тот ни другой не смогли выиграть у программы, хотя любая позиция была для них выигрышной. В 1978 г. Брауну удалось наконец взять реванш: забрав ладью ровно на 50-м ходу, он всё-таки смог выиграть в позиции, в которой при идеальной игре победа достигалась за 31 ход.

В 1970–1980-е гг. Томпсоном и другими энтузиастами были посчитаны все четырёхфигурные окончания, а к концу 1980-х — уже и все пятифигурные.

* В английском языке тут присутствует дополнительная игра слов: *earful of beer* означает «пивная взбучка», а созвучное ему *ear full of beer* — «полное ухо пива».

Результаты, полученные Томпсоном, наделали много шума в шахматном мире. «Идеальный игрок», которым стала машина, вскрыл множество человеческих заблуждений относительно шахматной игры. Эффект был столь сильным, что ревизии подверглись даже сами шахматные правила. Мы уже упоминали правило пятидесяти ходов — правило шахматной игры, согласно которому игрок, имеющий очередь хода, имеет право потребовать ничью, если на протяжении последних пятидесяти ходов ни одна фигура не была взята и не было ни одного хода пешкой. Ещё в начале XX в. шахматный композитор Алексей Троицкий доказал, что в некоторых эндшпилях («король и два коня против короля и пешки» и «король, ладья и слон против короля и ладьи») выигрыш достигается более чем за пятьдесят ходов, в связи с чем FIDE в 1928 г. установила в правиле увеличение числа ходов для подобных эндшпилей. Далее это правило ещё несколько изменялось, и к 1982 г. было три вида окончаний, для которых число ходов было увеличено до ста.

Но в 1989 г. из-за данных, полученных Томпсоном, число 50 заменили на 75 (вместо 100) уже для шести видов окончаний. Между тем компьютерный анализ эндшпиля продолжался, было открыто множество новых эндшпилей, нарушающих правило пятидесяти ходов, ввиду чего в 1992 г. было принято соломоново решение: отменить все исключения из правила пятидесяти ходов.

В настоящее время рекордный вариант семифигурного эндшпиля, найденный в 2008 г., представляет собой 517 ходов без взятий при наилучшей

игре для окончания «король, ферзь и конь против короля, ладьи, слона и коня».

В 1998 г. Евгений Налимов создал новый эффективный генератор шахматных окончаний. Благодаря этому, а также росту производительности компьютеров к началу 2000-х были посчитаны все шестифигурные окончания, что произвело настоящую революцию в понимании некоторых эндшпилей.

Весной — летом 2012 г. были рассчитаны семифигурные окончания. Авторы таблиц — Владимир Махнычев и Виктор Захаров, сотрудники факультета вычислительной математики и кибернетики (ВМиК) Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Таблицы названы таблицами Ломоносова, поскольку в расчётах, помимо компьютера IBM Blue Gene/P, был использован суперкомпьютер МГУ «Ломоносов».

В настоящее время существует два альтернативных набора эндшпильных таблиц для всех семифигурных окончаний (Lomonosov и Syzygy), база данных семифигурных эндшпилей в формате Syzygy занимает 17 терабайт дискового пространства.

Для восьмифигурных окончаний по состоянию на сентябрь 2023 г. просчитаны позиции без пешек и с блокирующими друг друга пешками разных цветов[491, 492].

3.3.4 Виды решений: сильное, слабое, ультраслабое

Способ, позволяющий выбирать идеальные стратегии в игре, часто называют решением игры, а сами игры, для которых найдены решения, — решёнными играми. При этом решения могут принадлежать к одному из трёх видов.

Первый — *сильное решение [strong solution]*. При наличии сильного решения мы знаем (либо можем установить, затратив разумное количество ресурсов) теоретическую игровую оценку [game-theoretic value] для любой допустимой позиции игры. Под теоретической игровой оценкой обычно понимают результат игры при идеальных действиях всех игроков (для игр с элементами случайности аналогом теоретической игровой оценки будет математическое ожидание результата игры при идеальных действиях игроков, но мы сейчас не будем погружаться в анализ игр с неполной или несовершенной информацией). Зная теоретическую игровую оценку для каждой из позиций игры, игрок в любой позиции может выбирать идеальные ходы, играя тем самым «на уровне бога».

Слабое решение [weak solution], в отличие от сильного, предполагает лишь наличие стратегии (либо возможность её получить при затрате разумного количества ресурсов), позволяющей каждому из игроков, начавших игру со стартовой позиции игры, достичь результата, не уступающего теоретической

3.3.4

Виды решений: сильное, слабое, ультраслабое

игровой оценке. Поясним отличие слабого решения на примере крестиков-ноликов. Обладая слабым решением, мы знаем, какой ход нужно сделать в стартовой позиции игры. В ответ на все ответные ходы соперника мы в свою очередь знаем наши наилучшие ответы и так далее. Однако, если мы в какой-либо позиции совершим ход, отличный от того, который рекомендует нам имеющееся решение, мы окажемся в позиции, для которой у нас уже не будет информации о лучшем ходе. Если стратегия, содержащаяся в слабом решении, говорит нам ставить крестик в левый верхний угол поля, а мы вопреки этой рекомендации поставили его, например, на клетку ниже, мы необязательно проиграем партию или упустим возможный выигрыш, но мы попадём в позицию, точная оценка которой неизвестна. Таким образом, наличие слабого решения позволяет нам играть «на уровне бога» лишь в некотором подмножестве валидных позиций игры, включающем начальную игровую позицию.

На картинке ниже изображена визуализация слабого решения для крестиков-ноликов. Пользоваться этой картинкой несложно. Если вы играете за крестики, вам понадобится левое изображение. Первым ходом поставьте крестик в левый верхний угол поля (помеченный на картинке самым крупным красным крестом). В зависимости от хода соперника выберите затем картинку, вписанную в одну из оставшихся восьми клеток поля. Например, если противник поставил свой нолик в правый нижний угол поля, вам нужно взять изображение, расположенное в правом нижнем углу. Красный крестик на нём расположен в правом верхнем углу поля, именно туда вам нужно поставить свой крестик — и так далее. Если вы играете ноликами, используйте аналогичным образом правую картинку.

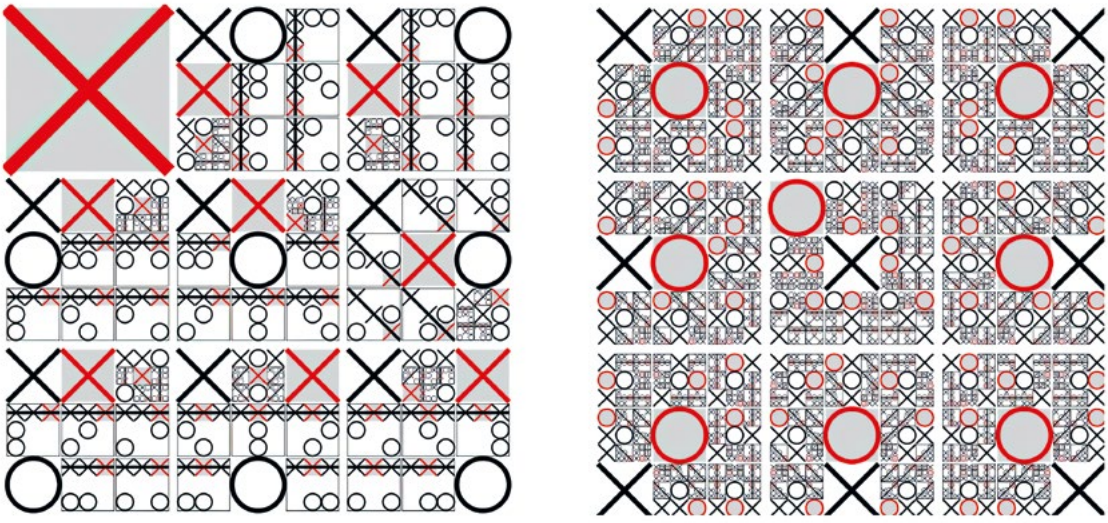


Рис. 55. Слабое решение для игры крестики-нолики

Благодаря тому, что слабое решение для крестиков-ноликов содержит гораздо меньше позиций, чем в принципе может возникнуть в игре, его удалось изобразить на одной книжной странице. Можете сфотографировать его на камеру телефона и затем использовать в качестве шпаргалки: если будете точно следовать его рекомендациям, то никогда не проиграете в крестики-нолики, а при ошибке противника никогда не упустите победу.

Также существует понятие *ультраслабого решения [ultra-weak solution]*, подразумевающего, что был определён результат при идеальной игре обеих сторон, однако сама последовательность ходов не определена.

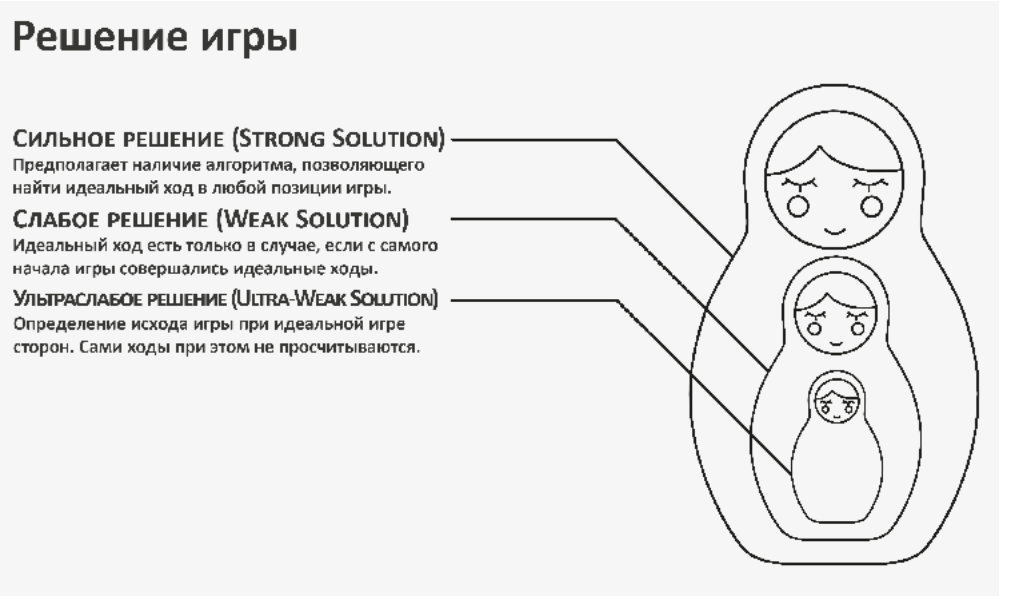


Рис. 56. Типы решений

3.3.5 Гекс — игра без ничьих

Забавно, что эту игру придумали независимо друг от друга сразу два человека — Пит Хейн в Дании в 1942 г. и Джон Нэш в США в 1948 г. Пит Хейн не менее знаменит среди датчан, чем Джон Нэш среди специалистов по теории игр. Будучи прямым потомком Пита Хейна — старшего, голландского моряка и народного героя XVII в., Пит Хейн — младший приобрёл известность благодаря созданию коротких стихотворных афоризмов, которые он называл «грукáми» (gruk). Груки были способом, позволявшим Хейну во время фашистской оккупации Дании обходить цензуру и доносить свои мысли до других датчан в иносказательной форме.

Отец кибернетики Норберт Винер был большим почитателем литературного таланта Хейна и так отзывался о его творчестве: *«Пит Хейн — мастер эпиграммы. Его следует читать по меньшей мере на двух уровнях — внешнем и более глубоком. И в том и в другом случае они вызывают во мне восхищение. Какое богатство значительных мыслей заключено в них!»* Многие строки Хейна стали крылатыми словами и поговорками. Хейн был не только талантливым литератором, но и художником, инженером и изобретателем. Когда Пит Хейн работал в Институте теоретической физики Университета Копенгагена, то именно его Нильс Бор избрал в качестве партнёра по «интеллектуальному пинг-понгу»[493, 494]. Помимо других научных проблем, Хейн размышлял над знаменитой топологической проблемой четырёх красок (теорема, которая утверждает, что всякую расположенную на сфере карту можно раскрасить не более чем четырьмя разными красками так, чтобы любые две области с общим участком границы были раскрашены в разные цвета), и ему пришла в голову идея новой игры. Хейн рассказал о ней в одной из своих лекций, и через некоторое время её правила опубликовала газета *Politiken*. Игра быстро стала весьма популярной в Дании — гекс тогда называли «многоугольники» и играли в него на бумаге. Со временем в продаже появились специальные блокноты для игры с напечатанными в них изображениями игровых полей. Задачи по гексу регулярно появлялись в газете *Politiken*, которая назначала премии за лучшие решения. В 1950-е гг. доски для игры в гекс

начала выпускать фирма Parker Brothers, тогда же игра и получила своё современное название — гекс.

Поле для игры в гекс состоит из шестиугольных ячеек. Оно может быть любого размера или формы, но обычно используют поле в форме ромба размером $n \times n$, обычно 11×11, 14×14 или 19×19. Нэш считал наилучшим размером 14×14.

Игра ведётся фишками двух цветов (обычно красными и синими). Игроки по очереди ставят фишки своего цвета в свободные ячейки поля. Первый ход делают синие.

Две противоположные стороны поля окрашены в красный и синий цвета и называются красной и синей сторонами соответственно. Ячейки в углах поля являются общими. Чтобы выиграть, игрок должен выстроить цепочку из своих фишек, соединив ею стороны своего цвета, то есть красные стремятся построить цепь из красных фишек между двумя красными сторонами доски, а синие — цепь из синих фишек, соединяющую синие стороны[495].

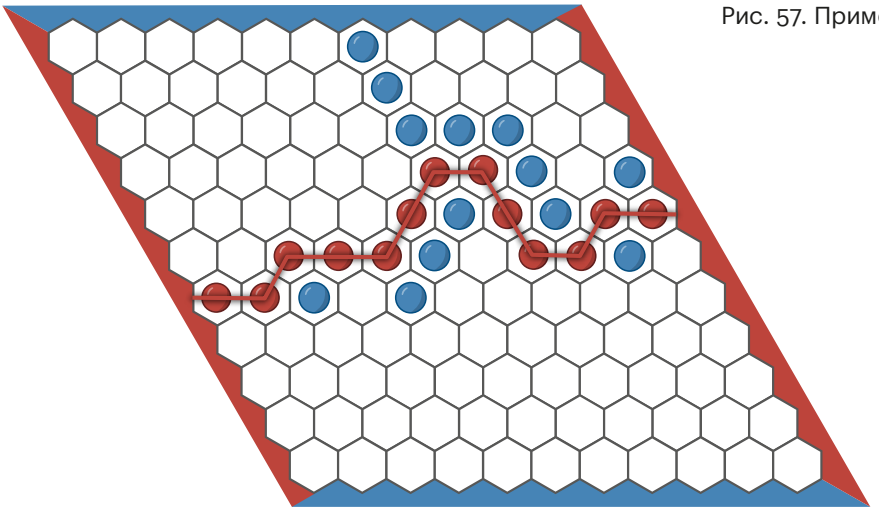


Рис. 57. Пример игры в гекс

В отношении гекса авторы статьи в русской «Википедии» утверждают следующее: *«Нетрудно заметить, что игра никогда не кончается вничью»*. Это утверждение напоминает мне анекдот про Лившица и Ландау, в котором первый заливает чаем сорок страниц доказательства, а второй советует заменить эти сорок страниц словами «очевидно, что...».

Джон Нэш был первым, кто указал (примерно в 1949 г.), что гекс не может закончиться ничьей. Это утверждение в разговорной речи иногда называют теоремой гекса. В наши дни известно, что теорема гекса эквивалентна теореме Брауэра о неподвижной точке. Рассуждения Нэша, однако, не были опубликованы в научной прессе, они содержатся во внутреннем техническом отчёте RAND Corporation, подготовленном в 1952 г. Дословно Нэш пишет в нём следующее: *«Природа игры такова, что если всё игровое поле заполнено*

фишками, то либо белые совершили соединение, либо чёрные сделали это (Нэш использовал эти два цвета для фишек играющих сторон. — *С. М.*). *Соединение и блокирование противника являются эквивалентными действиями»*[496]. Формальное доказательство было опубликовано Дэвидом Гейлом в 1979 г., то есть более чем через тридцать лет после изобретения игры. На самом деле оно совершенно нетривиальное и содержит десять шагов рассуждения:

1. Возьмём любое поле игры в гекс, все ячейки которого полностью заполнены отметками X (ставит первый игрок) или 0 (ставит второй игрок).
2. Возьмём точку соприкосновения сторон X и 0 в любом углу и от неё нарисуем путь вдоль рёбер, который будет проходить только между шестиугольниками с разными отметками X и 0. При этом края игрового поля мы считаем граничащими со сплошной стеной из шестиугольников с соответствующими стороне отметками (X или 0).
3. Каждая вершина пути будет окружена тремя шестиугольниками, и поэтому путь не сможет содержать самопересечений или петель, поскольку пересекающаяся часть пути должна проходить между двумя шестиугольниками с одинаковыми отметками. Таким образом, путь должен иметь завершение.
4. Путь не может завершаться в середине игрового поля, так как каждый конец пути заканчивается узлом, окружённым тремя шестиугольниками,

два из которых должны содержать разные отметки в соответствии с условием построения пути. Поскольку третий шестиугольник не может содержать отметку, отличающуюся одновременно от этих отметок двух других, то путь будет продолжен по одной или другой стороне третьего шестиугольника.

5. Аналогично путь не может заканчиваться и на краях поля, поскольку края игрового поля считаются граничащими со сплошной стеной из шестиугольников с соответствующими стороне отметками (X или 0).
6. Таким образом, путь может закончиться только в другом углу.
7. Согласно построению пути, с одной его стороны будет непрерывная цепочка из шестиугольников с отметкой X, а с другой — цепочка из шестиугольников с отметкой 0.
8. Из предыдущего следует, что путь не может закончиться в углу, противоположном начальному, потому что в нём метки X и 0 находятся на иных сторонах пути, чем в исходном углу. Таким образом, путь может соединять только смежные углы (принадлежащие одной стороне).
9. Поскольку путь соединяет смежные углы, сторона игрового поля между этими углами (скажем, сторона X) отрезана от остальной части игрового поля непрерывной цепью противоположных отметок (в данном случае 0). Эта неразрывная цепь обязательно соединяет две другие стороны, прилегающие к углам.
10. Таким образом, на полностью заполненном поле для игры в гекс должен быть победитель.

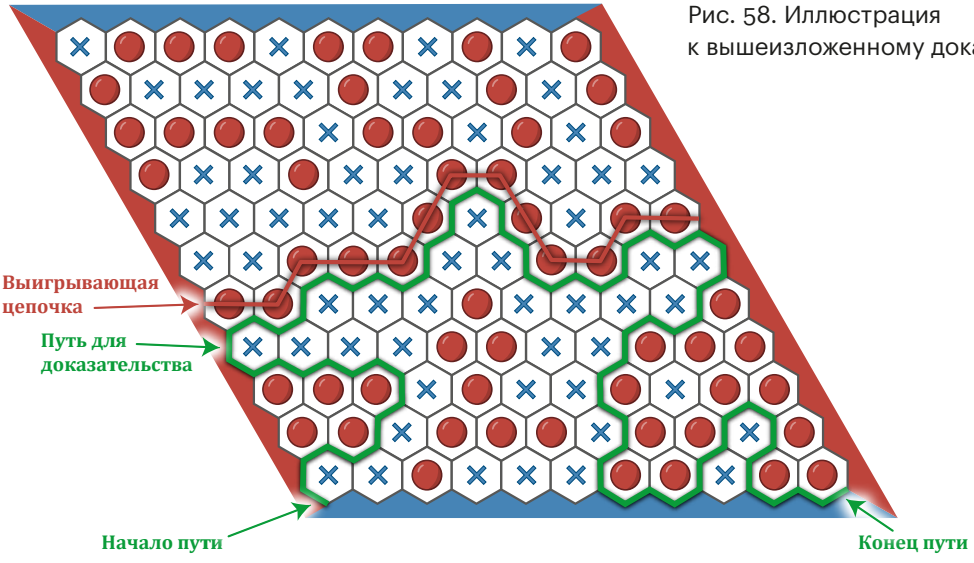


Рис. 58. Иллюстрация к вышеизложенному доказательству

Итак, геометрия гекса не позволяет ни одному из игроков рассчитывать на ничью, следовательно, при идеальной игре сторон у гекса должен быть

победитель[497]. В своём отчёте 1952 г. Нэш приводит любопытное соображение: *«В гексе,* — пишет он, — *наличие лишней фишки на игровом поле никогда не может быть недостатком. Это в корне отличается от ситуации в шахматах или го, в которых наличие фигуры или камня на определённом участке доски может быть помехой»*. Из этого Нэш делает вывод, что у игрока, ходящего вторым, не может быть выигрышной стратегии и что, следовательно, при идеальной игре обеих сторон игра является выигранной для первого игрока. Однако Нэш отмечает, что, по всей видимости, у первого игрока нет простой стратегии победы[498]. И действительно, до сих пор придумать какое-либо простое правило для первого игрока, позволяющее ему выигрывать в гекс с гарантией, не удалось. В настоящее время найдено слабое решение для игры в гекс лишь на поле 9×9, хотя благодаря доказательству Нэша мы знаем, что игра является теоретически выигранной первым игроком для любого размера поля. Таким образом, для гекса с произвольным размером поля мы обладаем ультраслабым решением.

3.3.5

Гекс — игра без ничьих

Иногда ультраслабым образом не может быть установлена точная теоретическая игровая оценка стартовой позиции, но может быть установлено её ограничение сверху или снизу. Например, в некоторых играх вторая сторона может повторять ходы противника, что гарантирует ей ничью. Для таких игр можно сказать, что их стартовая позиция точно не является выигрышной для первой стороны. Этот логический трюк называют обычно «воровством стратегии».

Решения разных игр 3.3.6

Для многих более простых игр слабые (а иногда даже сильные) решения обнаружились без привлечения машин. Например, для игры «магараджа» (или «магараджа и сипаи»), где чёрные имеют набор обычных шахматных фигур, а белые — единственную фигуру «магараджа», способную ходить и как ферзь, и как конь, было доказано, что при правильной игре чёрным гарантирована победа. Ещё до появления компьютеров люди смогли решить и ним, и крестики-нолики, однако последние достижения в области решения игр людям без помощи машин были бы явно не под силу. Например, 29 апреля 2007 г. команда исследователей из Университета Альберты (Канада) под руководством Джонатана Шеффера смогла достичь слабого решения для английских шашек, по правилам которых шашки не бьют назад, а дамки могут ходить лишь на соседние по диагонали поля, но в любую сторону.

Английские шашки — самая большая из игр, решённых до настоящего времени. Размер её поискового пространства (т. е. количество легальных позиций) — примерно 5×10^{20}. Для того чтобы найти решение, в течение 18 лет сеть персональных компьютеров (в разное время от 50 до 200) произвела 10^{14} вычислений.

Исследователям удалось найти решения для весьма внушительного списка игр, в который, в частности, входят «четыре в ряд», фанорона, вари (оваре), калах, шахматные поддавки (белые выигрывают, начиная игру ходом пешки на поле e3), ним, пентаго, баг-чал («тигры и козы»), кварто, тееко и множество других игр, о существовании которых я узнал, когда писал этот абзац.

Последней решённой игрой на данный момент стала пентаго. В отличие от шахмат и го поисковое пространство этой игры небольшое, что позволяет современному компьютеру играть идеально: с учётом всех возможных симметрий количество возможных позиций в пентаго составляет 3 009 081 623 421 558. В течение нескольких часов суперкомпьютер Edison семейства Cray, находящийся в Национальном научно-вычислительном центре энергетических исследований (NERSC), используя для вычислений целых 98 304 потока, нашёл сильное решение игры.

Шашки 3.4

Для того чтобы победить, я только лишь передвигал нужную шашку на нужное поле…

Марион Тинсли

Шашки — одна из самых древних настольных игр, известная человечеству с незапамятных времён. Археологические находки в Уре, одном из древнейших шумерских городов-государств древнего Южного Междуречья (Месопотамии), подтверждают существование ранней формы этой игры уже в III тысячелетии до н. э.[499] Аналог этой игры существовал и у древних египтян: найдены папирусы с изображением играющих людей, а также сами комплекты для игры.

Многочисленные упоминания игр, напоминающих шашки, встречаются у древнегреческих авторов. В гомеровской «Одиссее» женихи Пенелопы играют в «пессои» (πεσσοί) — вариант шашек, по преданию изобретённый Паламедом (Παλαμήδης)[500]. В других античных источниках эта игра (или подобные ей) упоминается под названиями «пять линий» (πέντε γραμμαί), «полеис» (πόλεις) и «псефои» (ψῆφοι). В качестве обобщающего названия различных видов игры в шашки древние греки использовали термин «петейя» (πεττεία)[501]. Платон в диалоге «Федр» указывает на древнеегипетское происхождение шашек и говорит, что их изобретение приписывается богу Тевту (по всей видимости, Тоту)[502].

В Древнем Риме наследником этой игры стала игра под названием *ludus latrunculorum*, *latrunculi* или попросту *latrones*. Её название образовано от слова *latro*, которое обозначает разбойника или солдата-наёмника. Арабский вариант шашек с доской размером 5 × 5 клеток назывался «киркат» (الق رق ات). В Испании эту игру стали называть «алькерк» (alquerque), под этим названием она известна и поныне[503]. Правила многих древних игр шашечного типа не сохранились до наших дней, а если и известны, то обычно существенно отличаются от современных шашек. Да и сами эти игры часто существовали в нескольких вариантах. Например, в латрункули, по всей видимости, могли играть на досках размером 7 × 8, 8 × 8, 9 × 10, 8 × 11 и даже 8 × 12 (по крайней мере, археологи обнаруживали поля для игры таких размеров)[504]. Даже сегодня существуют русские, английские, испанские, итальянские, португальские, чешские, французские, турецкие, армянские шашки — и ещё множество других

вариантов этой игры. В некоторых современных разновидностях шашек используются доски размером 8 × 8, 10 × 10 и даже 10 × 8.

Мы будем говорить в этой главе и далее об английских шашках, известных также под названием «чекерс» [checkers], поскольку история создания программ именно для этой игры наиболее насыщена событиями. Привычные всему миру правила этой игры окончательно оформились, по всей видимости, только на излёте Средневековья. Главное отличие: в привычных нам русских шашках дамка может ходить и бить по диагонали на любое число полей, а дамка в «чекерсе» ходит только на одно поле (вперёд или назад) и бьёт только через одно поле (вперёд или назад).

3.4.1 Начало. Шашечная программа Кристофера Стрейчи

Создание первой компьютерной программы для игры в шашки часто приписывают Артуру Сэмюэлу. Однако в действительности приоритет в этой области принадлежит, по-видимому, другому программисту — Кристоферу Стрейчи, что признавал и сам Сэмюэл. Вот что он писал по этому поводу:

Стрейчи действительно заинтересовался шашками довольно рано, хотя, возможно, не в 1947 году, когда я начал работать над своей программой в Университете Иллинойса. Тем не менее Чарльз Бэббидж <...> ещё раньше предлагал использовать свою «аналитическую машину» для игры в шашки и шахматы, так что Бэббидж в любом случае опередил нас обоих. Моя первая программа для игры в шашки для компьютера Illiac Иллинойсского университета так и не была ни разу запущена, потому что Illiac существовал только на бумаге, когда я покинул этот университет, чтобы перейти на работу в IBM в 1949 году. Только в 1952 году моя программа заработала на экспериментальной модели компьютера IBM 701. Кстати, эта первая программа была написана в машинных кодах (набор кодов операций конкретной вычислительной машины. — *С. М.*) *— ещё до того, как у нас появился символьный ассемблер.*

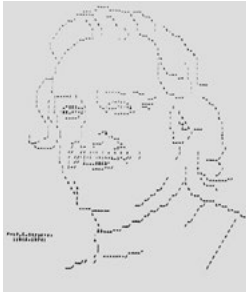


Рис. 59. Портрет Кристофера Стрейчи, отпечатанный при помощи компьютера, хранящийся в Бодлианской библиотеке Оксфордского университета

Я узнал о работе Стрейчи из статьи, которую он представил в Торонто в сентябре 1952 года. Поскольку его программа в то время уже была опубликована, я должен признать своё поражение. Только в 1954 году, с появлением IBM 704, моя программа смогла продемонстрировать интересную игру. Мой вклад заключался в добавлении «обучения» в программу, и я считаю, что могу претендовать на приоритет в этом вопросе[505].

3.4.1

Начало. Шашечная программа Кристофера Стрейчи

Первая версия программы Стрейчи для прототипа британского компьютера ACE (Automatic Computing Engine) была завершена в феврале 1951 г., однако объёма оперативной памяти машины оказалось недостаточно для полноценной работы программы.

Когда Стрейчи услышал о машине Manchester Mark 1, обладавшей значительно большим объёмом памяти, он попросил у бывшего сокурсника по Кингс-колледжу Кембриджа Алана Тьюринга руководство по программированию этой машины и к октябрю 1951 г. перевёл свою программу в машинный код для Manchester Mark 1 (коммерческая версия этой машины получила название Ferranti Mark 1) — иногда эту машину называют MADM (Manchester Automatic Digital Machine, Манчестерская автоматическая цифровая машина) или даже MADAM. Летом 1952 г. программа могла «сыграть полноценную партию в шашки на разумной скорости»[506].

Стрейчи был также одним из пионеров компьютерной музыки. В руководстве по программированию, полученному Стрейчи от Тьюринга, упоминается инструкция, позволяющая передавать импульсы на встроенный динамик компьютера. Тьюринг пишет, как, управляя паузами между импульсами, можно производить звуки разной высоты. Тьюринг рекомендует использовать эту инструкцию для оповещения оператора машины об определённых событиях[507]. Стрейчи сделал следующий шаг, научив машину исполнять несколько мелодий: британский гимн (*God Save the King* — дело было ещё при жизни Георга VI), *Baa Baa Black Sheep* и *In the Mood*. В 1951 г. мелодии были записаны вещательным подразделением Би-би-си. В 2016 г. исследователи из Университета Кентербери восстановили мастер-диск и загрузили записанные на него мелодии в облачный сервис Soundcloud[508, 509]. Таким образом, мелодии, созданные Стрейчи, стали первой дошедшей до нас компьютерной музыкой. Если бы Стрейчи чуть поторопился, то, возможно, его компьютерная музыка стала бы и первым в мире образцом компьютерной музыки, но его опередил Джеффри Хилл, научивший чуть раньше австралийский компьютер CSIR Mk1 воспроизводить «Марш полковника Боги» (Colonel Bogey March)[510].

Но, так или иначе, шашечная программа Стрейчи не просто научилась играть в шашки раньше программы Сэмюэла, но и исполняла в конце партии британский гимн[511].

В сентябре 1966 г. текст программы Стрейчи, переписанной на изобретённом им высокоуровневом языке программирования CPL, был опубликован в специальном выпуске журнала *Scientific American*, посвящённом информации. В 2011 г. Питер Норвиг реализовал простой транслятор с языка CPL на Python и, устранив несколько опечаток, смог вернуть программу Стрейчи «к жизни»[512].

Если взглянуть на начальную позицию в английских шашках, легко заметить, что белые могут начать партию одним из семи возможных полуходов (полуход, по-английски *ply*, возможно сокращение от *reply* — ответ, — перемещение шашки одного из цветов, ход — два последовательных полухода за

белых и за чёрных), на каждый из которых чёрные могут также ответить семью возможными ответными полуходами. Таким образом, в результате первого полухода на доске может возникнуть семь позиций, в результате двух последовательных полуходов — 49 позиций. Далее число возможных полуходов меняется, и после трёх полуходов на доске может возникнуть 302 позиции, но некоторые из них будут повторяться, поскольку возникнут в результате перестановок ходов, и уникальных позиций будет всего 216. Современные шашечные программы умеют учитывать подобные повторения, запоминая часть проанализированных позиций в оперативной памяти[513], но в начале 1950-х оперативная память Ferranti Mark 1 позволяла хранить всего 512 чисел, по 20 бит каждое[514], поэтому о таких изысках, как таблица перестановок, не приходилось и мечтать. С увеличением количества полуходов число их возможных цепочек растёт очень быстро: 5 полуходов — 7361 вариант (уникальных позиций — 2733), 6 полуходов — 36 768 вариантов (уникальных позиций — 9105), 7 полуходов — 179 740 вариантов (уникальных позиций — 28 123) и так далее. При 28 полуходах мы получим астрономическое число 16 377 718 018 836 900 735 вариантов[515]. Современному компьютеру, способному просматривать 10 млн вариантов в секунду, потребовалось бы на их рассмотрение почти 52 000 лет, а ведь речь идёт лишь о партиях не длиннее 14 ходов. Совершенно очевидно, что перебор необходимо каким-то образом ограничить. Программа Стрейчи способна просматривать дерево вариантов игры на фиксированное число полуходов. При этом, поскольку позиции в терминальных узлах дерева в ряде случаев ещё далеки от завершения игры, Стрейчи использовал вместо неизвестной точной оценки позиции приближённую, выбрав в качестве приближения разницу в числе своих шашек и шашек противника (дамка оценивалась в четыре шашки). Функцию, выполняющую такую приближённую оценку позиции, сегодня принято называть оценочной функцией [evaluation function]. Подчёркивая неточный, основанный на предположениях и догадках характер заложенного в них знания, подобные функции называют эвристическими (от др.-греч. εὑρίσκω — отыскиваю, открываю). Действительно, хотя позиции, в которых у одной из сторон есть преимущество в числе шашек, часто являются выигрышными для этой стороны, но из такого правила несложно найти множество исключений.

Примечательно, что с математической точки зрения оценочная функция, выбранная Стрейчи, является полиномом: $f = M_c - M_p + 4K_c - 4K_p$, где M_c — число шашек машины, M_p — число шашек противника, K_c — число дамок машины, K_p — число дамок противника. Все позиции в шашках, согласно теореме Цермело, должны быть либо выигрышными, либо проигрышными, либо ничейными при идеальной игре обеих сторон. В примере с крестиками-ноликами мы использовали для выигрышной позиции оценку «1», для ничейной — «0» и для проигрышной — «–1». Такая оценка очевидным образом связана с числом очков, которое игрок получит при соответствующем результате, $s = (v + 1) / 2$, где s — число очков, а $v \in \{-1, 0, 1\}$ — оценка, которую мы использовали в крестиках-ноликах. Оценка со знаком позволяла нам легко получить значение оценки для противника, достаточно было просто поменять у оценки знак: $v_c = -v_p$, вместо

того чтобы выполнять менее наглядную операцию вычитания оценки из единицы: $s_c = 1 - s_p$, но это в некоторой степени дело вкуса.

В случае эвристической оценки мы в подавляющем большинстве случаев не уверены в её точности. Из-за этой неуверенности оценка приобретает вероятностный характер. Казалось бы, разумно использовать в качестве оценки математическое ожидание количества очков: $s \in [0; 1]$, $s = 1 \times p(W) + 0{,}5 \times p(D)$, где $p(W)$ — вероятность победы, $p(D)$ — вероятность ничьей, а для удобства можно было бы преобразовать оценку к виду $v \in [-1; 1]$, чтобы работал трюк с переменой знака. Однако вместо этого создатели первых шашечных и шахматных программ выбрали на первый взгляд весьма неудобную полиномиальную форму оценки f, где она может принимать большие по модулю положительные и отрицательные значения. Получается, что позиция, в которой у машины все 12 шашек стали дамками, а у противника не осталось ни одной шашки, будет иметь оценку, равную, например, 48, а если бы дамки оценивались не в 4 единицы, а в 40, то мы получили бы число 480. Но каков смысл этого числа? Каким образом оно связано с ожидаемым результатом партии?

3.4.1

Начало. Шашечная программа Кристофера Стрейчи

На самом деле такая аддитивная оценка, безусловно, связана с вероятностью победы каждой из сторон. Если бы мы взяли программу Стрейчи и заставили её разыграть астрономическое количество случайных позиций, а затем построили график, в котором по оси x отложили оценку позиции f, а по оси y — среднее количество очков, набранных в играх, начатых с позиции с оценкой x, то получили бы график, напоминающий график логистической функции: $s(x) = 1 / (1 + e^{-kx})$, где k — некоторый масштабный коэффициент, e — основание натурального логарифма.

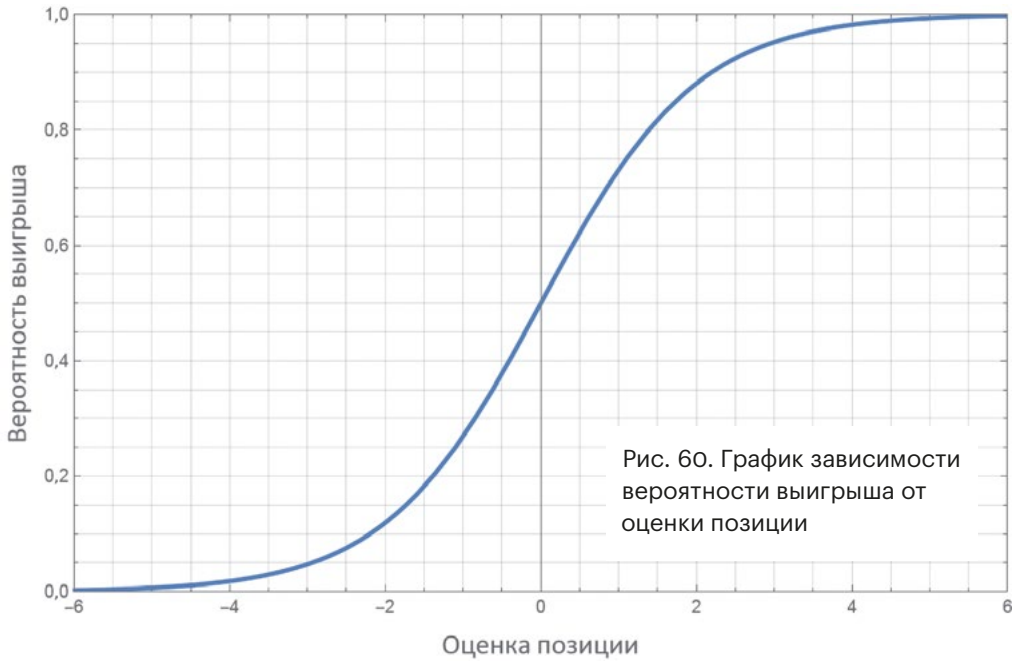


Рис. 60. График зависимости вероятности выигрыша от оценки позиции

То есть выбранный Стрейчи способ оценки всё-таки был связан с вероятностью победы, хотя и неочевидным образом. Но к чему такие сложности, почему бы не использовать в качестве оценки собственно вероятность?

Всё дело в том, что именно такой способ оценки позиции, при котором мы просто представляем её в виде суммы оценок каждого взятого по отдельности признака, является более привычным для людей. В любом шашечном или шахматном учебнике вы найдёте способы оценки, сформулированные именно в таком виде. Например, шахматный учебник скажет, что слон и конь сто́ят примерно по три пешки, ладья — пять, а ферзь — девять. Такой способ оценки позиции является частью старинной традиции. Ещё итальянские шахматные мастера XVII–XVIII вв. пытались оценить «стоимость» фигур в пешках, а их последователи стали аналогичным образом оценивать и различные позиционные факторы. В шашках тоже удобно принять за эталон «стоимость» одной шашки и исчислять «стоимость» дамки, а также различных позиционных элементов оценки, сравнивая их с принятым эталоном. В XX в. машины учились играть в игры у людей и не слишком часто преподавали уроки людям, поэтому и развитие ИИ было в очень большой степени основано на человеческих экспертных знаниях. В 1967 г. Сэмюэл так охарактеризовал современное ему положение вещей: *«...при нынешнем уровне развития знаний единственным практическим подходом будет, даже при наличии помощи со стороны цифрового компьютера, разработка эвристик, основанных на копировании* (тут автор применяет глагол *to ape*, т. е. дословно „собезьянивании“. — *С. М.*) *поведения человека»*[516].

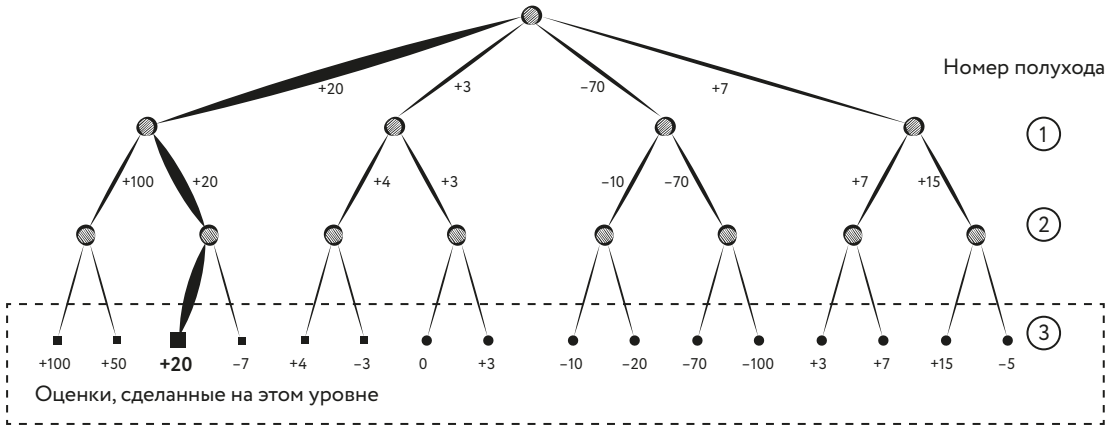


Рис. 61. Упрощённая диаграмма, показывающая, как оценки поднимаются по дереву возможных ходов, чтобы получить наилучший следующий ход. Процесс оценки начинается на уровне (3), где машина выбирает ветку с наиболее положительной оценкой. Далее на уровне (2) от противника ожидается выбор ветки с наименьшей оценкой, и на уровне (1) машина выбирает ветку с наибольшей оценкой

Итак, программа Стрейчи стремилась выбрать ход, который максимизировал бы значение оценочной функции при наилучших ответных действиях оппонента. Такой метод обычно называют минимаксом, поскольку, рассматривая собственные ходы (на нечётных уровнях дерева), программа выбирает ход с максимальной оценкой, а рассматривая ходы оппонента (на чётных уровнях дерева), выбирает ходы, минимизирующие оценку. Если на каждом уровне дерева менять знак оценки на противоположный, то можно обойтись одной только максимизацией. Такую модификацию минимакса обычно называют негамаксом.

Изобретение минимакса часто приписывают фон Нейману, ведь он рассматривается в одной из его ранних работ — «К теории стратегических игр» (Zur Theorie der Gesellschaftsspiele), написанной в 1928 г.[517] В действительности приоритет в данном случае, по всей видимости, принадлежит ~~Сирио Форелю~~ Эмилю Борелю, который сформулировал отдельные положения теории игр раньше фон Неймана и независимо от него[518]. При некоторой фантазии можно говорить и о приоритете Бэббиджа[519], который предложил похожий алгоритм для выбора хода в крестиках-ноликах. Как бы то ни было, и Борель, и фон Нейман, и Бэббидж отталкивались от окончательных оценок в терминальных узлах дерева перебора, использовать же усечённое дерево и приближённые оценки первым предложил Норберт Винер[520].

Максимальная скорость перебора, осуществляемого программой Стрейчи в 1950-е гг., могла достигать, по-видимому, нескольких десятков, быть может ста позиций в секунду, что позволяло программе за разумное время анализировать варианты на глубину три-четыре полухода[521]. Конечно, при столь неглубоком анализе вариантов и крайне примитивной оценочной функции рассчитывать на сильную игру программы не приходилось. Стрейчи не уделял особого внимания дальнейшему развитию алгоритмов, заложенных в программу, и следующий этап развития компьютерных шашек был связан уже с программой Сэмюэла.

Продолжение. Шашечная программа Артура Сэмюэла 3.4.2

Программа, описанная Сэмюэлом в статье 1967 г., отличается от программы Стрейчи примерно так же, как ВАЗ-2101 («копейка», которую, к слову, начали производить тремя годами позже) от крестьянской телеги. В программе Сэмюэла уже можно разглядеть многие черты современных шашечных и шахматных программ.

Для начала Сэмюэл выбрал для оценки обычных шашек и дамок величины, относящиеся друг к другу как 3 : 4, что более точно соответствовало человеческим экспертным знаниям. Помимо подсчёта шашек и дамок на доске, Сэмюэл добавил в оценочную функцию множество позиционных факторов.

Например, учитывались мобильность (количество потенциальных ходов у каждого из игроков без учёта взятий) и контроль каждой из сторон над различными участками поля. Сама игра была разделена на шесть стадий, в каждой из которых значения оценок каждого из факторов могли быть разными. Кроме того, оценочная функция Сэмюэла учитывала сочетания некоторых факторов, а также тот факт, что в зависимости от очерёдности хода эти сочетания могут иметь различную оценку. В результате итоговая оценочная функция имела более 10 000 параметров. Хотя Сэмюэл и использовал фиксированный набор факторов, он замахнулся ещё и на автоматический подбор их значений. Действительно, установить значения для такого внушительного набора параметров экспертным путём представлялось малореальным.

Однако для автоматической подстройки нужна была обучающая выборка. Для того чтобы её создать, примерно 250 000 позиций из игр шашечных мастеров было выбито на перфокартах, а затем перенесено на магнитную ленту. Для каждой позиции был отмечен ход, сделанный игроком (использовались только позиции с ходами не проигравших партию игроков). Затем Сэмюэл использовал весьма нетривиальную процедуру, включающую специальные способы сглаживания значений параметров, для подбора таких их значений, чтобы при переборе на один полуход в глубину его программа как можно чаще «угадывала» ходы, сделанные мастерами (в случае взятий глубина перебора могла увеличиваться). Сеанс обучения длился около десяти часов.

Для оценки качества предсказания Сэмюэл использовал простую метрику, напоминающую коэффициент корреляции: $C = (L - H) / (L + H)$, где L — суммарное количество всех возможных ходов, которые программа оценила ниже, чем «правильный» ход, сделанный мастером, H — суммарное количество всех возможных ходов, которые программа оценила выше, чем ход, сделанный мастером. Таким образом, при полном угадывании программой ходов мастера метрика C будет равна «1», при полном неугадывании — «–1», а при случайной оценке ходов — «0».

Хотя отдельные ходы мастеров могли быть ошибочными либо имели равные им по силе альтернативы, Сэмюэл считал, что при достаточно большом объёме выборки это не будет являться серьёзной проблемой. В результате экспериментов по подстройке параметров автору удалось получить значение $C = 0{,}26$ при использовании оценочной функции, учитывающей значение каждого из факторов по отдельности, и $C = 0{,}48$ для функции, использовавшей сочетания факторов. По оценке Сэмюэла, подобранные параметры позволяли программе при переборе в глубину на один полуход в 64% случаев ставить ход мастера по оценке на первое или второе место[522].

Радикальным образом изменился и механизм перебора вариантов. Внимательные читатели наверняка заметили один из очевидных изъянов программы Стрейчи — фиксированную глубину анализа вариантов. Представим, что перебор ограничен глубиной в два полухода и производится в позиции с равным количеством шашек, а вторым полуходом оказалось взятие соперником

3.4.2

Продолжение. Шашечная программа Артура Сэмюэла

нашей шашки. Оценочная функция, рассматривая позицию, возникшую после взятия, даст ей отрицательную оценку — действительно, в этой позиции у противника появилось преимущество в шашку. Однако взятие на самом деле может быть началом банального размена, и уже на следующем полуходе взятая шашка отыгрывается обратно. Но машина этого «не видит», потому что исчерпан лимит глубины перебора. Эта проблема сегодня широко известна под названием «эффект горизонта». Сэмюэл боролся с ней, позволяя программе прерывать перебор только в узлах дерева, в которых нет взятий.

Ещё одним радикальным нововведением стало применение так называемого альфа-бета-отсечения[523]. Этот метод был в нескольких разных модификациях независимо открыт и развит в разное время целым рядом исследователей. К их числу относятся Джон Маккарти, который впервые выдвинул идею на ставшей впоследствии знаменитой Дартмутской конференции 1956 г.; Аллен Ньюэлл, Герберт Саймон и Клифф Шоу, описавшие в 1958 г. алгоритм перебора шахматной программы, использующей односторонний вариант альфа-бета-отсечения; Александр Брудно, в 1963 г. независимо от американцев разработавший этот метод (под названием «метод граней и оценок») и формально доказавший его корректность; Джеймс Слейгл, Филип Бурский, Джон Диксон и сам Сэмюэл, которые описали метод в своих статьях конца 1960-х, и, наконец, Дональд Кнут и Рональд Мур, уточнившие определение и посвятившие альфа-бета-отсечению в 1974 г. отдельное объёмное исследование[524].

Основная идея метода заключается в том, что в некоторых случаях нам не нужно знать точную оценку того или иного варианта в дереве перебора, достаточно лишь установить, что эта оценка выше или ниже определённой границы. Например, программа проанализировала некоторый ход *X* в определённой позиции и обнаружила, что он приводит к выигрышу шашки. Анализируя альтернативный ход *Y*, она обнаруживает, что у противника есть ответный ход, который приводит к ничейной позиции. В таком случае анализ всех остальных возможных ответов противника на ход *Y* избыточен: да, может быть, у противника есть ещё более сильный ответ, который, например, приводит к потере машиной шашки, но это уже совершенно не важно, ведь ход *Y уже был опровергнут*. Верхняя граница оценки (beta) для одного игрока является взятой с противоположным знаком нижней границей оценки (alpha) для второго игрока, и наоборот. Таким образом, процедура перебора получает в качестве параметров величины alpha и beta и осуществляет поиск внутри «окна», задаваемого этими параметрами. Если в ходе перебора машине всегда везло и первый рассмотренный ход в каждом из узлов дерева перебора оказывался действительно сильнейшим, то вместо рассмотрения N позиций в ходе перебора нам потребуется рассмотреть их только около $\sqrt{N}$, что является весьма существенным достижением. Конечно, на практике упорядочить ходы-кандидаты идеальным образом не получится, но за последние полвека создатели шахматных и шашечных программ придумали множество остроумных алгоритмов, позволяющих эффективно выявлять

наиболее перспективные ходы-кандидаты. Например, можно использовать перебор вариантов с сокращённой глубиной, чтобы выявить самый потенциально сильный ход, как это делал Сэмюэл. Важно отметить, что альфа-бета-отсечение является полностью корректным, то есть гарантирует получение той же самой оценки в корне дерева перебора, что и алгоритм полного перебора вариантов без отсечений.

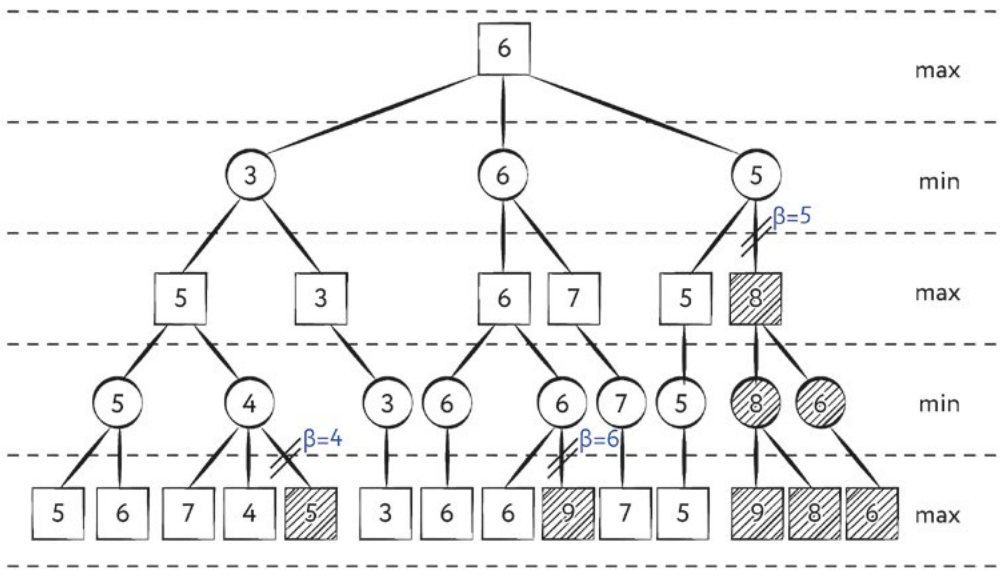


Рис. 62. Пример работы альфа-бета-отсечения

Помимо альфа-бета-отсечения, программа Сэмюэла использовала и набор весьма оригинальных эвристических отсечений.

И наконец, программа Сэмюэла использовала метод обучения, названный «зубрёжка» (rote learning) и заключавшийся в запоминании оценок позиций, уже встречавшихся в предыдущих партиях. Встретив такую позицию в нижних узлах дерева перебора, программа повторно использовала оценку, полученную в прошлый раз в результате более глубокого перебора, что позволяло не только сэкономить время, но и получить более надёжную оценку (поскольку глубина перебора в прошлый раз была больше, то меньше была и вероятность ошибки), избежав, возможно, ошибки, сделанной в предыдущий раз. Учитывая, что дебюты и окончания шашечных партий часто повторяются, этот метод был достаточно эффективен[525].

Одной из целей создания программы Сэмюэла стала необходимость тестирования нового компьютера. Будучи сотрудником компании IBM, Сэмюэл предположил, что программа для игры в шашки может послужить удобным инструментом проверки полноты и эффективности набора инструкций,

предлагаемых для машины IBM 701, в разработке которой он принимал участие.

Работа над IBM 701 привела среди прочего к появлению одного из фундаментальных компьютерных алгоритмов — метода, называемого сегодня хешированием. Благодаря Сэмюэлу и его коллегам современные компьютерные программы могут быстро заносить данные в таблицы и столь же быстро извлекать их оттуда.

3.4.2

Продолжение. Шашечная программа Артура Сэмюэла

Спустя три десятилетия Сэмюэл так описывал свою работу: *«В те дни IBM не слишком хорошо относилась к тому, что один из их инженеров тратит рабочее время на игру в шашки, пусть даже и против машины, поэтому большую часть моей работы по шашкам приходилось выполнять в свободное время. Я придал своей работе некоторую степень респектабельности, снабдив программу функцией обучения, но даже тогда только использование программы в качестве непрерывно работающего средства тестирования компьютера позволяло мне получать машинное время, необходимое для проверки моих экспериментальных обучающих процедур».*

24 февраля 1956 г. программа Сэмюэла была впервые публично продемонстрирована в телевизионной передаче. Перед этим Томас Уотсон — старший, тогдашний президент IBM, организовал показ программы акционерам *, [526].

В 1961 г. Эдвард Фейгенбаум и Джулиан Фельдман, работавшие над первым фундаментальным трудом, обобщавшим результаты исследований в области ИИ под названием «Компьютеры и мысль» (Computers and Thought), попросили Сэмюэла предоставить для сборника статью о методах, используемых в его программе. Одним из пожеланий было наличие приложения к статье, в котором обсуждалась бы лучшая из партий, сыгранных программой. Сэмюэл решил, что лучшим способом добыть такую партию будет организация матча с каким-либо сильным шашистом. В качестве соперника был выбран Роберт Нили [527]. *IBM Research News* утверждала, что Нили был «чемпионом Коннектикута по шашкам и одним из ведущих игроков страны» [528]. История с партиями программы Сэмюэла против Нили — один из увлекательных детективных эпизодов истории ИИ. Нили, по всей видимости, был лишь чемпионом Коннектикута среди незрячих игроков. Более того, в 1962 г. он завоевал титул чемпиона США среди незрячих игроков в турнире, организованном Американской шашечной федерацией (American Checkers Federation, ACF). Однако титул он получил по причине неявки других игроков — у Нили попросту не нашлось ни одного противника. Первый соперник появился у Нили только год спустя, в турнире 1964 г. (уже на звание чемпиона мира среди незрячих игроков!), когда Нили удалось отстоять титул в матче из четырёх партий [529]. В ряде источников утверждается также, что Нили был

* В ряде источников встречается, что он предсказал рост цены акций IBM на 15 пунктов ввиду выхода телевизионного сюжета и оказался прав. Однако более скрупулёзный анализ динамики котировок акций компании свидетельствует о том, что это не более чем миф. В действительности в тот день торговля акциями IBM закрылась с незначительным снижением, а рост котировок в последующие недели происходил со среднерыночными темпами.

мастером, однако Джонатану Шефферу не удалось обнаружить подтверждений наличия у Нили этого звания.

Были ли основания утверждать, что Нили — «один из ведущих игроков страны»? Современный анализ партии, проигранной Нили программе Сэмюэла, показывает, что обе стороны совершали ошибки и, по мнению Шеффера, ошибки, допущенные Нили, были слишком грубы для «одного из ведущих игроков страны».

Программа выиграла, и это произвело эффект разорвавшейся бомбы. Интеллектуальное превосходство человека оспаривается электронными монстрами! Компьютеры появились лишь недавно, но уже превзошли человека в шашках! Скоро они превзойдут его и во всём остальном! Словом, для невежественной публики 1962 г. это стало крупным событием. Даже тот факт, что год спустя Нили выиграл у программы Сэмюэла в мачте из шести партий, победив в одной и завершив вничью пять остальных, уже не мог остановить распространение соответствующих настроений в обществе.

В 1966 г. Сэмюэл взял свою программу на матч за звание чемпиона мира между Уолтером Хеллманом (действующим чемпионом из США) и британским претендентом Дереком Олдбери. IBM выступила спонсором мероприятия при условии, что участники сыграют несколько партий с программой Сэмюэла. Было сыграно четыре игры против каждого соперника, и все они окончились поражением программы. Стало ясно, что ожидания были несколько завышенными.

Лишь спустя десятилетие появилась действительно сильная шашечная программа, она была написана в Университете Дьюка Эриком Дженсеном и Томом Траскоттом при поддержке доктора Алана Бирмана. Изначально программа называлась Duke *, но затем была переименована в Paaslow. Новое имя программа получила в честь персонажа одного из скетчей Монти Пайтона — мистера Пасло (Paslow). Дженсен записал имя персонажа на слух, удвоив букву A, чтобы подчеркнуть правильный вариант произношения (в скетче имя произносится именно с долгим [a:]), подобно тому как это сделано в названии государственного образования Синт-Мартен (Sint Maarten). Спустя много лет Дженсен расстроился, когда обнаружил, что в сценарии скетча имя этого безголового персонажа было записано как Paslo, без буквы W на конце[530]. Впрочем, современные варианты[531] сценария, доступные в Сети, придерживаются варианта Paslow, что делает резонным вопрос о том, знает ли кто-то теперь, какой именно вариант правильный.

В качестве аппаратной платформы проекта разработчики использовали мощный для того времени компьютер IBM 370. Поскольку Дженсен и Траскотт не были опытными игроками в шашки, то при создании оценочной функции они ориентировались на работы Сэмюэла. В то же время у разработчиков был опыт создания одной из сильнейших шахматных программ своего времени, что, по всей видимости, оказалось в данном случае

* Duke значит «герцог» и в то же время совпадает с названием университета; шахматная программа, в разработке которой также участвовал Траскотт, называлась Duchess — «герцогиня».

3.4.2

Продолжение. Шашечная программа Артура Сэмюэла

решающим — в 1977 г. программа Дженсена и Траскотта выиграла всухую матч из двух игр против программы Сэмюэла. Затем состоялся демонстрационный матч из пяти игр с гроссмейстером Элбертом Лаудером, в котором программа смогла выиграть одну партию, проиграла две и две оставшиеся завершились вничью. Причём в партии, выигранной программой, она в какой-то момент находилась в проигранной позиции, но затем Лаудер совершил ошибку и умудрился проиграть.

Хотя некоторые авторы и считали, что «люди не могли сравниться с Paaslow»[532], шашечные эксперты не разделяли столь безудержного энтузиазма, и дело было даже не в том, что Лаудер выиграл этот небольшой матч.

Известный эксперт в области шашек и многократный чемпион Иллинойса Ричард Фортман, комментируя игру Duke против программы Сэмюэла, писал: *«Игра в окончании, особенно во второй игре, была ужасной. Должен сказать, что в настоящее время есть несколько тысяч средних игроков-второразрядников [class B players], которые могут без проблем победить любой компьютер»*. Уильям Гранжан, секретарь Американской шашечной федерации, прокомментировал качество игры так: *«Мнение доктора Бирмана, что программа Duke близка к статусу чемпиона мира, — смехотворно»*.

Команда Университета Дьюка тем не менее была вдохновлена своими успехами и желала бросить вызов чемпиону мира — доктору Мариону Тинсли. Последний, заручившись поддержкой Американской шашечной федерации, предложил открытое пари на сумму 5000 долларов сроком на пять лет, утверждая, что победит любую шашечную программу[533]. К сожалению, авторам программы не удалось собрать необходимую сумму денег: 5000 долларов в 1977 г. были весьма внушительной суммой, эквивалентной более 25 000 долларов 2023 г.[534] Надежда привлечь внимание национального телевидения также провалилась. Программа Дженсена и Траскотта с этого момента не сыграла ни одной публичной партии, и работа над ней была прекращена[535].

Удивительно, но чрезмерно оптимистичное освещение успехов первых шашечных программ имело отрицательный эффект. Оптимизм Сэмюэла, многократно усиленный прессой, привёл к распространению заблуждения о том, что шашки были «решены», или по крайней мере о том, что компьютерные программы бесповоротно превзошли человека в этой игре. Отчасти здесь сыграла роль, по всей видимости, иллюзорная простота шашек — ведь по сравнению с шахматами в них всего два вида фигур, да и перемещаться они могут лишь по чёрным клеткам доски. Многие научные и научно-популярные книги и статьи упорно плодили заблуждения, и даже пари, объявленное Тинсли, не смогло переломить силу многократно растиражированного невежества.

Со времён Paaslow и до 1989 г. в области компьютерных шашек царило затишье[536], а когда в 1992 г. Джонатан Шеффер, встретившись на одной из конференций с членом Совета естественных наук и инженерии Канады (NSERC), основного агентства финансирования научных исследований в стране, поинтересовался, почему прошлогодний запрос на финансирование исследований

 ИИ с использованием шашек в качестве экспериментального испытательного стенда был отклонён, то получил ответ: *«А разве Сэмюэл не решил эту игру ещё тридцать лет назад?»*

3.4.3 Дебют программы Chinook Джонатана Шеффера

В 1989 г. в Лондоне под эгидой ICGA состоялась первая Компьютерная олимпиада. Она включала следующие дисциплины: шахматы, шашки, го на доске 9 × 9, го на доске 19 × 19, бридж, нарды, домино, «четыре в ряд», отелло (реверси), рэндзю, скрэббл, го-моку, китайские шахматы и авари. В соревновании по шашкам участвовало шесть программ, и первое место с отрывом в одно очко заняла канадская программа Chinook (по-русски читается как «шинук»), созданная командой под руководством Джонатана Шеффера. Вообще-то, изначально программа называлась The Beast («Зверь»), но перед Олимпиадой название было решено изменить на более нейтральное Chinook в честь юго-западного ветра (фёна) на восточных склонах Скалистых гор в Канаде. Дело в том, что в Великобритании шашки называются *draughts*, а *draught* или *draft* — это среди прочего «сквозняк» или «порыв ветра» (вообще говоря, у слова *draft* есть 63 значения, если верить словарю Google), поэтому для канадской шашечной программы хорошо подходило название тёплого канадского ветра. Также словом *chinook* в Канаде называют чавычу — рыбу семейства лососёвых. Норман Трелоар, один из членов команды Chinook, занимавшийся разработкой библиотеки дебютов и оценочной функцией, задавался перед Олимпиадой вопросом: будет ли Chinook играть как ветер или как рыба (рыбой — *fish* — иногда уничижительно называют слабых игроков)? К счастью для команды, Chinook играл скорее как ветер *.

К моменту начала работы над Chinook Шеффер уже имел богатый опыт шахматного программирования: его шахматная программа Phoenix, или Sun Phoenix («Феникс», или «Солнечный Феникс»), разделила с тремя другими программами первое место (оказавшись, правда, на четвёртом месте по дополнительным показателям) на V чемпионате мира по шахматам среди компьютерных программ в 1986 г. в Кёльне. Chinook использовал богатый набор техник, разработанных к тому времени создателями шахматных программ.

Во-первых, в программе Шеффера применялись таблицы окончаний, содержавшие готовые ответы для окончаний с четырьмя и менее шашками на доске. Это во многом решало проблему плохой игры шашечных программ в окончаниях. Во-вторых, Chinook также использовал широко применяемую

* Здесь и далее я буду использовать мужской род для программ Chinook, Fritz и нескольких других. Формально это неправильно, но фразы типа «Chinook играла» или «Fritz выиграла» звучат неестественно и режут мне слух.

и в наши дни технику под названием «итеративное углубление» (iterative deepening). Её суть заключается в том, что программа сначала перебирает варианты на минимальную глубину, затем увеличивает глубину рассмотрения, выполняет повторный перебор и так далее, пока не закончится отведённое на перебор время. Благодаря использованию хеш-таблицы для хранения результатов анализа уже рассмотренных узлов дерева (так называемая

таблица перестановок или перестановок/опровержений — transposition/refutation table), предыдущие шаги перебора не пропадают напрасно. Результаты анализа, полученные на предыдущей итерации, используются для более эффективного упорядочения ходов, что делает альфа-бета-отсечения более эффективными. Кроме того, таблица перестановок эффективно решает собственно проблему перестановок: если разные последовательности ходов приводят к одной и той же позиции, то повторного изучения вариантов не будет.

Заметим, что более качественное упорядочивание ходов при переборе позволяет заменить классические альфа-бета-отсечения на так называемый перебор с единичным окном, то есть перебор, при котором beta = alpha + 1. Идея этого подхода заключается в том, что если перебор для первого рассматриваемого хода в узле дерева перебора вернул оценку, не превышающую верхнюю границу (т. е. значение параметра beta), то, скорее всего, остальные ходы будут не лучше первого и для проверки этой гипотезы для всех последующих ходов в данном узле вместо перебора с полным окном (т. е. с нижней границей, равной alpha, и верхней границей, равной beta) мы будем использовать перебор с единичным окном (с v до $v + 1$, где v — оценка для первого хода). Если при переборе с таким окном мы для очередного хода получили оценку меньше или равную v, то для данного хода нет необходимости перебора с полным окном, потому что его результат не будет лучше v (а может оказаться только хуже или равным ему), то есть данный ход необходимо отвергнуть. И только если оценка для какого-либо из ходов превысит v, тогда этот ход оказывается лучше первого и мы повторяем для него перебор, но уже с расширенным окном, чтобы узнать его точную оценку. Такой подход при условии хороших методов упорядочивания ходов-кандидатов позволяет добиться дополнительного уменьшения количества перебираемых позиций. Существует несколько алгоритмов, реализующих данный подход, наиболее широко известные — «поиск основного варианта» (Principal Variation Search, PVS) и NegaScout.

Программа Шеффера также содержала набор эвристик для принятия решения об увеличении или уменьшении глубины перебора в отдельных узлах дерева. Весь этот сложный набор алгоритмов позволял при использовании компьютеров, доступных в 1980-е, анализировать варианты на 13–20 (а иногда и более) полуходов в глубину при минутном контроле.

На конец 1989 г. программа Шеффера победила в компьютерной олимпиаде (четыре победы и одна ничья), сыграла три партии по телефону с бывшим чемпионом Канады 1971 и 1972 г. Эдом Томпсоном (две победы Chinook и ничья), из шести партий с одним из сильнейших игроков Великобритании Ричардом Паском пять закончились вничью и одна поражением программы, а в матче из четырёх партий с Дереком Олдбери, в своё время обыгравшим со счётом 4 : 0 программу Сэмюэла, Chinook победил, завершив две партии победой и две ничьей.

Однако в определённый момент позиция Олдбери в одной из проигранных партий была выигрышной, а во второй британский чемпион явно

экспериментировал. Олдбери, сам к тому времени увлёкшийся программированием и разработавший собственную шашечную программу Checker Hustler, показал Шефферу некоторые недостатки его программы.

Таким образом, несмотря на очевидный прогресс в области компьютерных шашек, было не до конца понятно, способны ли лучшие шашечные программы соревноваться с лучшими игроками-людьми и заявить претензии на чемпионский титул.

3.4.3

Дебют программы Chinook Джонатана Шеффера

Им владел «ужасный Тинсли» — самый опасный соперник.

Американский математик и шашист Марион Тинсли был сильнейшим игроком мира в английские шашки на протяжении тридцати лет. Тинсли ни разу в жизни не проигрывал матч за первенство мира и с 1958 г. проиграл в официальных турнирах всего три партии.

В середине 1990 г. Шеффер задался вопросом: насколько хорош Тинсли на самом деле? Чемпионы мира по шахматам тоже очень хороши в игре против других людей, но всё же они периодически проигрывают партии другим игрокам, а последующий анализ турнирных партий нередко выявляет ошибки, допущенные в пылу сражения. Союзником чемпиона всегда является его имя: противники оказываются психологически подавлены репутацией чемпиона. Из-за волнения они не верят в то, что чемпион мог допустить просчёт, отказываются от решительных действий, ведущих к победе. Сильной стороной машины, напротив, является её бесстрастность: она ничего не знает о своём оппоненте, свободна от страха, спокойно действует даже в, казалось бы, безнадёжных позициях. В итоге нередко выясняется, что эти позиции в действительности не являются такими уж безнадёжными. Действительно ли партии Тинсли так идеальны, пройдут ли они скрупулёзную проверку машинным интеллектом?

Найти игры Тинсли было легко[537]. Книга «Шашки по-тинслевски» (Checkers the Tinsley Way) содержала около семисот игр Тинсли с 1945 по 1981 г.[538] Конечно, игр за последнее десятилетие не хватало, но Шеффер предположил, что в таком возрасте (а Тинсли в 1981 г. исполнилось 54 года) стиль игры вряд ли мог радикально измениться.

Шеффер взял 732 партии из книги, разделил их между четырьмя компьютерами и запрограммировал Chinook осуществлять анализ позиций из этих партий, при этом игнорировались проигрышные ходы в играх, которые Тинсли проиграл, а также первые десять ходов партии, поскольку выбор дебютов был во многом вопросом индивидуального вкуса. Для каждой позиции Chinook на основе глубокого перебора должен был выбрать лучший ход. Если ход совпадал с решением Тинсли, то Chinook переходил к следующей позиции, если нет — производился перебор для хода, сделанного Тинсли, и оценки обоих ходов сохранялись в файле. Обычно значения оценок были близки. Шеффера и его команду интересовали ситуации, в которых Тинсли совершал ход, по оценке сильно уступающий ходу, предложенному Chinook. Иначе говоря, позиции, в которых программа считала, что Тинсли допустил серьёзный просчёт.

В результате анализа Шефферу удалось найти 17 позиций, в которых ход, предложенный Chinook, по оценке превосходил ход, сделанный в партии Тинсли, хотя бы на 100 единиц, то есть на «стоимость» одной шашки. Однако анализ уже первых из них показал, что в число этих ходов входят неоптимальные выигрывающие ходы. То есть Chinook придумал, как Тинсли мог бы выиграть партии немного быстрее, но конечный результат от этого бы не изменился. Расстроенный Шеффер изменил значение разницы оценок до 50 единиц, но и это радикально не поменяло картину. Удалось найти всего две позиции, в которых Тинсли вроде бы действительно ошибался. Шеффер заставил программу проанализировать эти позиции более глубоко — отведя на каждую из них целую ночь вычислений. В первой позиции ошибка не подтвердилась: позиция, казавшаяся проигранной, оказалась ничейной. Но в последней позиции ночь анализа не изменила оценку программы: она считала, что Тинсли ошибался. Итак, Тинсли был смертным — он был способен допустить ошибки, точнее — одну ошибку.

Впрочем, радость Шеффера продолжалась недолго. Немного позже гроссмейстер Лео Левитт, которому Шеффер показал найденную позицию, продемонстрировал, что, хотя белые на первый взгляд и имели преимущество, у них не было способа его реализовать[539].

Но хотя Шеффер и думал уже о возможности победы над самим Тинсли, вначале Chinook должен был явно продемонстрировать, что превосходит других возможных претендентов на титул.

С 13 по 18 августа 1990 г. в городе Тупело (штат Миссисипи) должен был состояться чемпионат США по шашкам.

Шеффер обратился в Американскую шашечную федерацию с просьбой разрешить его программе участвовать в чемпионате при условии, что он не будет претендовать на призовой фонд в случае победы. Шеффер получил соответствующее разрешение, а также разрешение выступить в качестве «разогрева» на чемпионате штата Миссисипи, который предшествовал национальному и должен был пройти в том же отеле в Тупело двумя днями раньше.

Чемпионат Миссисипи завершился победой Chinook — восемь побед, шесть ничейных партий и ни одного поражения. Впереди был чемпионат США, а почти одновременно с ним, с 15 по 21 августа 1990 г., в Лондоне проводилась II Компьютерная олимпиада. Спортсменам-людям в подобных случаях приходится выбирать, ведь человек не может одновременно находиться в двух местах. Для компьютерной программы это не помеха. Пока Шеффер и Трелоар в качестве операторов Chinook находились на турнире в Тупело, за океаном копия программы участвовала в Компьютерной олимпиаде под управлением другого члена команды — Пола Лю[540].

На Компьютерной олимпиаде в Лондоне у Chinook было всего два противника: Colossus, программа, созданная Мартином Брайантом, и Checker-Mate Эдриана Миллетта и Дерека Олдбери.

Colossus — шашечная программа Брайанта, в создании которой он опирался на опыт в работе с одноимённой шахматной программой, — была сильным

противником: незадолго до того, как Chinook победил в Миссисипи, она одержала победу на чемпионате Западной Англии (23–24 июня 1990 г.).

Миллетт и Олдбери, выступавшие на предыдущей, 1989-го, Олимпиаде каждый со своей программой (Sage Draughts и Checker Hustler) и занявшие соответственно второе и первое места с конца турнирной таблицы[541], для выступления в 1990 г. решили объединить свои сильные стороны — высококлассную шашечную экспертизу Олдбери с опытом Миллетта в области программирования. Олдбери приготовил для Checker-Mate продвинутую дебютную библиотеку, заложив в неё ряд ловушек — дебютных вариантов, приводивших игру к позициям, в которых программе противника было бы трудно найти правильный ход в условиях ограниченного времени. В одну из таких ловушек и попал Chinook, однако крышка мышеловки не захлопнулась: вариант в дебютной библиотеке Checker-Mate заканчивался слишком рано — и в ответ на ошибку Chinook его противник не смог ответить правильным ходом. В итоге из-за ошибки в алгоритме распределения времени Checker-Mate просрочил время, и партия завершилась победой Chinook. Казалось бы, угроза миновала, тучи рассеялись и на небе снова засияло солнце. Это действительно было бы так, если бы противниками программы Шеффера на турнире были новички, а не закалённые турнирными соревнованиями ветераны компьютерных шахматных и шашечных баталий. Быстро сообразив, что именно произошло в партии Checker-Mate с Chinook, автор программы Colossus быстро добавил в свою дебютную библиотеку ту же самую ловушку, дополнив дебютную линию ходом, который не удалось найти программе Миллетта и Олдбери, и в партии с Colossus Chinook повторно заглотил наживку, что обернулось для программы Шеффера «баранкой» в турнирной таблице[542]. Пол Лю, в отличие от Шеффера и Трелоара, не обладал должным опытом, чтобы после партии с Checker-Mate принять необходимые контрмеры. Турнирное золото ушло в копилку Брайанта, в то время как команде Chinook пришлось довольствоваться вторым местом[543].

3.4.3

Дебют программы Chinook Джонатана Шеффера

Интересно, что и на чемпионате США в Тупело у Шеффера неожиданно появился компьютерный оппонент. Американская шашечная федерация вполне резонно решила, что если в матче разрешено участвовать Chinook, то на аналогичных условиях в нём могут принять участие и другие программы. Этим не преминул воспользоваться Гил Доджен, автор программы Checkers Experimental[544]. Предыдущая версия его программы — Checkers! — участвовала в Компьютерной олимпиаде 1989-го и заняла второе место, отстав от Chinook всего на одно очко[545]. После олимпиады Шеффер и Доджен обменялись исходными кодами своих программ. Правда, за время, прошедшее с олимпиады, команде Шеффера удалось создать пятифигурные таблицы окончаний, но всё же кто знал, как много пользы автор Checkers! смог извлечь из изучения Chinook за прошедший год. Хотя Доджен и использовал в качестве аппаратной платформы для своей программы компьютер MIPS MI20, в полтора раза более медленный, чем IBM RS/6000, на котором работал Chinook[546], это могло и не быть решающим фактором. Все прекрасно помнили урок[547], который преподал в 1989 г. Ричард Лэнг со своей шахматной

программой Mephisto, одержав победу над шестипроцессорным монстром Deep Thought (прародителем Deep Blue) на Северо-Американском чемпионате по шахматам среди компьютерных программ. А ведь Mephisto использовала скромный даже по тем временам процессор Motorola 68030 с тактовой частотой 36 МГц[548]. Кроме того, гроссмейстеры Лео Левитт и Эд Маркузик жили недалеко от Доджена и могли помочь ему с профессиональной экспертизой в области шашек. Словом, Гил Доджен со своей программой был серьёзным противником, которого нельзя было недооценивать.

Но вернёмся к чемпионату США в Тупело. Он стал серьёзным испытанием для Chinook, которое программа успешно преодолела, — не проиграв ни одной партии, Chinook занял второе место, уступив лишь действующему чемпиону мира Марион Тинсли. Программа Checkers Experimental Гила Доджена заняла восьмое место[549].

Напряжение в определённые моменты турнира было очень велико. Вот как описывает Шеффер одну из партий — против гроссмейстера, будущего чемпиона мира Рональда Кинга:

Как обычно, я спокойно сидел за доской, читая книгу, время от времени поглядывая на экран компьютера. С покерфейсом, как обычно, — я старался не выдавать волнение, которое ощущал. Но поскольку мы выигрывали, мне было трудно сосредоточиться на книге, и я стал чаще поглядывать на экран. Кинг

был сосредоточен, лениво барабаня пальцами по столу, не подавая никаких признаков того, понял ли он, что проигрывал, или нет. Я прочитал страницу и снова поднял глаза. Он по-прежнему был сосредоточен и всё ещё барабанил пальцами. На этот раз пальцы, казалось, переместились на доску. Ещё одной страницей позже я увидел его пальцы, танцующие вперёд-назад над шашкой Chinook. Я притворился, что читаю, но подглядывал за ним уголком глаза. Я с недоверием наблюдал, как эти пальцы медленно толкают шашку к краю доски и наконец — через край. Постепенно шашка была скинута в кучу шашек, ранее снятых с доски. В этот момент я вежливо протянул руку, поднял шашку и поставил её обратно на доску. Он не выказал никакой реакции. Неужели он действительно думал, что компьютер «забудет» о шашке?

По возвращении с соревнований Шеффер попытался связаться с Артуром Сэмюэлом. Он был уверен, что тот будет рад услышать об успехе Chinook, воплощении в реальность своей сорокалетней мечты. Но в ответ получил печальное известие: профессор Артур Сэмюэл умер 29 июля 1990 г. от осложнений, вызванных болезнью Паркинсона[550].

Артур Сэмюэл оставил в истории компьютерных технологий значительный след, не ограничивающийся одними только компьютерными шашками. Например, он, совместно с Дональдом Кнутом, работал над популярной в научной среде системой компьютерной вёрстки TeX, внеся в её создание весьма существенный вклад, несмотря на то что в те годы ему уже перевалило за 80 лет[551]. Своими смелыми попытками решить задачу создания шашечного ИИ в условиях крайне ограниченных аппаратных ресурсов 1950–1970-х гг. Сэмюэл вдохновил многих молодых исследователей, и, хотя его работы и вызвали некоторое головокружение от успехов, даже это стало в конечном счёте полезным уроком для специалистов.

Первый матч против чемпиона мира 3.4.4

В 1991 г. Американская шашечная федерация и Английская ассоциация шашек (English Draughts Association, EDA) решили не санкционировать матч Chinook — Тинсли на том основании, что компьютеры не могут претендовать на звание чемпиона мира по шашкам. Они постановили, что Тинсли будет защищать свой титул против действующего английского чемпиона Дерека Олдбери. Тинсли, однако, хотел сыграть с Chinook — его привлекал тот факт, что, в то время как люди в партиях с чемпионом стремятся к ничьей, машина практикует агрессивный, атакующий стиль. Он не смог убедить ACF и EDA принять Chinook в качестве претендента в матче за титул чемпиона мира и заявил, что отказывается от титула в пользу Олдбери. Обе организации пытались убедить Тинсли передумать, но он твёрдо стоял на своём. В августе ему было присвоено звание «Почётный чемпион мира» (World Champion Emeritus) в знак признания особых заслуг перед миром шашек.

Никто не сомневался, что Тинсли по-прежнему остаётся лучшим игроком среди людей. Таким образом, любой матч между ним и Chinook будет де-факто матчем за звание лучшего игрока планеты. Понимая это, ACF в конечном итоге решила санкционировать матч под вывеской «Первого чемпионата мира по шашкам человек против машины» (First Man versus Machine World Checkers/Draughts Championship).

Матч был организован в августе 1992 г. в отеле Park Lane в Лондоне, там же, где в 1986 г. проходил матч на первенство мира по шахматам между Гарри Каспаровым и Анатолием Карповым. Призовой фонд составлял 10 000 долларов, которые должны были быть разделены в соотношении 60 : 40 в пользу победителя либо 50 : 50 в случае ничьей. Матч состоял из сорока партий, что являлось сложившимся стандартом для чемпионских матчей между людьми[552, 553].

За два года, предшествовавших матчу, Chinook успел сыграть несколько товарищеских матчей с ведущими шашистами, в том числе и с самим Тинсли: товарищеский матч 1990 г. завершился победой Тинсли, который выиграл одну партию при 13 ничьих. В 1991 г. Chinook также уступил в матче Дону Лафферти, но тоже с минимальным разрывом — 2 : 3 при 11 ничьих. В 1992 г. состоялись матчи с учителем Тинсли Асой Лонгом — ничья 1 : 1 при 18 ничьих, а также с известным экспертом в области шашек Джимом Лоем — 3 : 0 при одной ничьей. Chinook также выступил на Открытом чемпионате южных штатов (Southern States Open), где занял первое место, и на Национальном чемпионате США, где разделил 2–6-е места (впрочем, оказавшись на 6-м месте по дополнительным показателям) с тремя гроссмейстерами и программой Гила Доджена.

Всё выглядело так, как будто с 1990 по 1992 г. прогресс в силе игры программы не был существенным. Конечно, противники Chinook были экстраординарными. В одной из партий товарищеского матча с Тинсли чемпион так прокомментировал десятый ход программы: *«Вы пожалеете об этом!»* [You're going to regret that!]. Программа смогла увидеть поражение лишь на 33-м ходу, анализируя позицию на 19 полуходов вперёд. Вряд ли Тинсли на десятом ходу рассчитал победный вариант на глубину в 65 полуходов, однако понимание тонкостей позиции позволяло ему видеть победу задолго до материализации преимущества.

При этом технически с 1990 г. Chinook проделал долгий путь в своём развитии. Программа получила возможность осуществлять параллельный перебор на многопроцессорных компьютерах. Для матча с Тинсли компания-спонсор Silicon Graphics предоставила восьмипроцессорную машину SGI 4D/480. К началу матча с Тинсли Chinook обладал полным набором семишашечных таблиц окончаний и 43% восьмишашечных. Было внесено множество доработок в оценочную функцию[554].

Но быстрое развитие порождает болезни роста. Недостаточно проверенные новации зачастую опаснее, чем отсутствие новшеств. Отдельные моменты из воспоминаний Шеффера сегодня способны напугать программистов почище иного триллера. Как вам, например, внесение изменений в оценочную функцию программы прямо во время матча? Да ещё и добавление

3.4.4

Первый матч против чемпиона мира

новых элементов оценки с весами, выбранными на глазок? А выводы, сделанные на основе всего лишь сотни партий между двумя версиями программы, да ещё и завершившихся с разрывом всего в несколько очков? Сегодня подобное трудно представить: десятки тысяч проверочных игр, тонкая настройка каждого параметра при помощи сотен тысяч партий, проверки проверок, учёт и контроль. Мир программирования игрового ИИ в 1990-е с позиции сегодняшних практик выглядит как мир Дикого Запада.

Был и другой фактор, действие которого нельзя недооценивать: не только Chinook изменился за эти два года, но и люди. Если в 1990 г. многие сильнейшие игроки недооценивали программу, играли против неё слишком беспечно, не понимали её специфических слабостей, то теперь против Chinook играли уже всерьёз: партии программы обсуждались и анализировались, производилась интенсивная дебютная подготовка.

Но вернёмся к противостоянию с чемпионом мира.

Итак, матч с Тинсли начался. Четыре первые партии окончились вничью. Пятую Chinook проиграл — причиной стал ошибочный вариант в дебютной библиотеке. Он был позаимствован из книги «Основы игры в шашки» (Basic Checkers), и хотя на момент матча Тинсли с Chinook уже было известно, что соответствующая позиция оценивается неправильно, однако команда Шеффера об этом не знала.

Но в восьмой партии матча программе удалось впервые выиграть у Тинсли, тем самым доказав на практике, что такое возможно! В 14-й партии Chinook смог выиграть ещё раз и тем самым повести в счёте.

Однако с 18-й партии Chinook стали преследовать неприятности. Началось всё с ошибки охранника отеля, который вместо того, чтобы в конце дня выключить свет и включить кондиционер в комнате, где находилась машина, сделал всё ровным счётом наоборот — выключил кондиционер и включил свет. На следующий день в 18-й партии программа зависла, и команде Chinook пришлось признать поражение. Было ли это зависание результатом перегрева машины или виной были дефекты при программировании многопроцессорной версии? Это так и не удалось с точностью установить, хотя позже в программе обнаружили ряд ошибок, и как минимум одна из них теоретически могла привести к зависанию.

В 22-й партии проблема повторилась, и Шефферу пришлось перейти на более медленный запасной компьютер (сама партия закончилась вничью). Тинсли выиграл 25-ю партию (программе не хватило примерно двух минут для того, чтобы отказаться от ошибочного хода и выбрать правильный) и захватил лидерство в матче. Длинная серия ничьих продолжалась до 39-й партии. Чтобы сохранить лидерство, Тинсли нужно было не проиграть, и более осторожная игра позволяла ему увеличить шансы на победу в матче. После 28-й партии Шеффер и его команда вносили в программу изменения, стараясь обострить игру, однако это не принесло успеха. Chinook потерпел ещё одно поражение в 39-й партии, и тем самым матч завершился победой Тинсли — из 39 сыгранных партий Тинсли выиграл четыре, Chinook — две, а остальные 33 завершились вничью.

Несмотря на поражение, Шеффер не собирался сдаваться. И что было не менее важно — Тинсли тоже не считал борьбу завершённой и поддержал идею организации нового матча, который, однако, состоялся только в 1994 г. из-за организационных проблем.

До этого, в 1993 г., Chinook поучаствовал в двух матчах. Первый, против Дона Лафферти, вновь закончился поражением программы (три поражения, одна победа и 14 ничьих). Шеффер героически сражался с ошибками — казалось, они были повсюду: в новом коде для различения «лёгких» и «трудных» ничьих, в новых восьмишашечных таблицах окончаний, в дебютной библиотеке.

Второй матч 1993 г. был не менее трудным: Chinook должен был встретиться с программой Colossus Мартина Брайанта, которая нанесла ему поражение на Компьютерной олимпиаде 1990-го. Дело в том, что критики Chinook нередко указывали на то, что программа Шеффера, возможно, была не самой сильной шашечной программой. В конце концов, если Chinook уступил программе Colossus в 1990 г., быть может, именно Colossus должен был играть матч с Тинсли? Требовалось поскорее разрешить эти сомнения[555].

Матч, организованный в канадском Эдмонтоне, завершился уверенной победой Chinook — девять побед, два поражения и 43 ничьих. Да-да, в мире спорта такая разница в очках считается «уверенной победой». Если принять вероятность ничьей в партии между Chinook и Colossus за 43/54, то получается, что при абсолютно равной силе игры обеих программ вероятность того, что матч из 54 партий между ними закончится с разницей в семь очков и более составляет около 5%, что, в общем-то, не так уж мало. Впрочем, с 1990 г. это действительно был самый надёжный турнирный результат. Основываясь на результатах игр Chinook против Тинсли, совершенно нельзя было быть уверенным в том, что Тинсли играет сильнее программы. Даже результаты турниров из нескольких десятков партий во многом зависят от случая — это понимали и Шеффер и Тинсли.

По итогам матча Шеффер и Брайант расстались друзьями. Шеффер передал Брайанту шестишашечные таблицы окончаний, а Брайант передал Шефферу дебютную библиотеку Colossus, которая примерно в восемь раз превосходила по размеру библиотеку Chinook. Позже Брайант стал постоянным помощником Шеффера в работе над программой.

Следующий, 1994-й год для команды Шеффера тоже был богат событиями. Chinook без единого поражения выиграл матч против Дерека Олдбери, который был объявлен чемпионом мира после ухода Тинсли: три победы и девять ничьих (к сожалению, этот матч стал для Олдбери последним в его жизни, он скончался 9 июля 1994 г.). Затем последовал матч с Доном Лафферти, завершившийся миром: 18 ничьих при отсутствии результативных партий. Два выступления в турнирах также завершились благоприятно: первое место в Открытом чемпионате южных штатов[556] и делёж с Лафферти и Тинсли 1–3-го мест в Национальном чемпионате США (по дополнительным характеристикам ниже Лафферти, но выше Тинсли!)[557].

Решающий матч 3.4.5

Долгожданный матч между Тинсли и Chinook начался 15 августа 1994 г. в помещении Компьютерного музея в Бостоне, при этом стороны договорились уменьшить число партий в матче до тридцати.

На открытии присутствовали Дэвид Леви и Реймонд Кин — гроссмейстер по шахматам и известный шахматный автор и организатор, Тони Бьюзен — создатель популярной в наши дни техники «интеллект-карт» (mind maps), ряд знаменитых специалистов в области компьютерных наук, включая Марвина Минского — одного из отцов искусственного интеллекта, а также множество журналистов.

Чтобы воочию понаблюдать за игрой, на матч приехали известные шашисты, в частности гроссмейстер Норман Векслер и мастер Джулс Леопольд. Леопольд играл с программой Сэмюэла в 1957 г. и утверждал, что был первым мастером, сыгравшим в шашки против компьютера, — тогда он выиграл партию без труда. По словам Джулса, доктор Сэмюэл спросил его: *«Как вы думаете, компьютер когда-нибудь сможет победить вас?»* Джулс ответил: *«Нет, никогда»*. Тинсли рассказал Шефферу, что однажды Джулс позвонил ему посреди ночи. «Марион, — взволнованно сказал он, — знаете ли вы, что *Tinsley* является анаграммой *Yeltsin*?» Сказав эти слова, он повесил трубку.

Подготовка профессиональных игроков в шашки, как и в случае шахматистов, включает в себя создание дебютных заготовок — специально разработанных вариантов, целью которых является возникновение на доске заранее тщательно проанализированной позиции в надежде на то, что сопернику в турнирной спешке не хватит времени, чтобы отыскать правильные ходы. Шеффер и Брайант потратили много времени, чтобы удивить Тинсли, заботливо приберегая для матча найденные дебютные новинки.

Две партии первого дня завершились вничью, при этом во второй партии Тинсли успешно отстоял более слабую позицию, найдя единственные ходы, спасшие его от поражения.

Во второй день должны были состояться четыре игры.

После двух лёгких ничьих, во время перерыва, Тинсли спросил Шеффера о матче с Олдбери. Он знал, что программа одержала победу, но не знал окончательного счёта. Шеффер сообщил Тинсли счёт. Немного помолчав, Тинсли сказал с шутливой улыбкой: *«Chinook играет с Олдбери. Chinook побеждает Олдбери. Олдбери умирает»*. Тинсли сделал драматическую паузу и продолжил: *«Должно быть, он умер от шинукита [Chinookitis]!»*

Тинсли рассмеялся. Это была странная и болезненная шутка не слишком удачливого юмориста. Впрочем, сам Тинсли посчитал эту остроту достаточно забавной, чтобы рассказать её в тот же день ещё нескольким людям.

Пятая игра снова закончилась ничьей. В шестой партии Тинсли уклонился от ожидаемого варианта, где его ждал дебютный сюрприз, заготовленный

Chinook, сказав: *«Если бы я не устал, я бы сыграл a7–b6 вместо e7–f6»*, и в итоге игра завершилась ещё одной ничьей. Тинсли выглядел чуть более худым, чем обычно, и немного постаревшим.

Шеффер так описал произошедшие на следующий день события: *«За несколько минут до официального времени начала седьмой партии, Марион прибывает в зал турнира. Он прогуливается своей обычной медленной размеренной походкой, одетый в тот же зелёный костюм, который, кажется, носит всегда. Подняв глаза от клавиатуры, я вижу его улыбку — он обменивается с кем-то приветствиями. Затем он подходит ко мне и садится в своё кресло на противоположной от меня стороне шахматной доски. <…> Тинсли садится, его голова опущена. Он приподнимает голову, чтобы посмотреть в глаза, но останавливается. Вместо этого, оставляя очки направленными вниз, в сторону игровой доски, он двигает вверх зрачки — до тех пор, пока наши взгляды наконец не пересекаются. Я бодро говорю: „Доброе утро, Марион“, и он без колебаний отвечает: „Позвольте мне предложить немыслимое. Что, если Дон Лафферти закончит матч за меня?“»*

Тинсли был вынужден прервать матч из-за тяжёлых болей в области желудка, которые изматывали его и не давали спать по ночам. Проведённые быстро анализы подтвердили самые худшие опасения — у Тинсли обнаружили рак поджелудочной железы. Он был вынужден сдать матч и уступить титул Chinook.

Тинсли боролся с болезнью ещё полгода и ушёл из жизни 3 апреля 1995 г. — так и не побеждённый за игровой доской.

Место Тинсли в Бостоне занял Дон Лафферти, с которым был организован матч из 20 партий. Он сыграл 18 партий вничью, выиграл одну партию (воспользовавшись дебютной заготовкой, созданной Тинсли) и одну проиграл, что сделало результат матча ничейным[558].

3.4.6 Нахождение слабого решения шашек

Ситуация, возникшая после сдачи матча Марионом Тинсли, была крайне напряжённой. Многие, в том числе Английская ассоциация шашек, не признавали чемпионство Chinook — ведь титул был завоёван не за игровой доской. Всё это вкупе с враждебным отношением многих людей к машинам вносило вклад в гнетущую атмосферу.

Обстоятельства осложнялись тем, что действующим чемпионом мира среди людей после смерти Олдбери стал Рональд Кинг, который также не завоевал чемпионства за игровой доской. Пресса недалёкими статьями об эпическом противостоянии Человека и Машины увеличивала градус враждебности. Некоторые ограниченные умы просто не могли вместить мысль, что, кто бы ни победил за шашечной доской — шашист или шашечная программа, — результат всё равно является триумфом человеческого гения.

3.4.6

Нахождение слабого решения шашек

Чтобы распутать клубок противоречий, потребовались незаурядные организационные и дипломатические усилия.

В 1995 г. Британская федерация шашек (British Draughts Federation, BDF) — недавно созданная организация, которая, в отличие от EDF, признавала за машинами право на завоевание чемпионского титула, — и ACF организовали новый матч Chinook против Лафферти, в котором программа победила в одной партии при 31 ничьей. В 1996 г. Chinook с большим отрывом выиграл у чемпиона мира в игре по переписке Джерри Чайлдерса — восемь побед и 12 ничьих, традиционно победил в Открытом чемпионате южных штатов, а затем — в Американском национальном чемпионате, оторвавшись от Рональда Кинга на целых восемь очков[559]. Матч из двух партий с Рональдом Кингом годом позже (одна победа программы и одна ничья) стал последним публичным выступлением Chinook. С 1995 г. программа не потерпела ни одного поражения в турнирах[560].

В 1800 г. в книге Джошуа Стёрджеса[561] «Руководство по игре в шашки» (Guide to the Game of Draughts) была опубликована позиция, в отношении которой утверждалось, что при идеальной игре обеих сторон в ней побеждают белые[562]. Позиция вызвала обширные дебаты среди шашечных экспертов, которые не утихали в течение ста лет, и лишь публикация 1900 г. окончательно убедила общество в том, что белые действительно побеждают. В честь многолетнего спора этюд получил название «столетней позиции». В 1997 г. Лафферти попросил Шеффера проверить выводы экспертов. В течение нескольких секунд Chinook определил, что позиция в действительности является ничейной. Взглянув на решение, Лафферти обнаружил, что общепринятое доказательство содержало ошибку на третьем ходу, пропущенную десятками экспертов-шашистов. С этого момента этюд Стёрджеса более известен под именем «200-летняя задача»[563] или даже, что более точно, «197-летняя позиция»[564].

Победа над Тинсли была навязчивой идеей Шеффера на протяжении многих лет. Работая с маниакальным упорством, он и члены его команды достигли, казалось, невозможного — и лишь для того, чтобы надежда в последний момент ускользнула из их рук. Программа была близка к совершенству: после выхода из длинных дебютных вариантов глубокий перебор быстро достигал позиций из восьмишашечных таблиц окончаний. Однако насколько можно было полагаться на эти дебютные варианты? Насколько хороши были те немногие ходы, в которых машина не успела за выделенное ей время получить точную оценку позиции? Более поздний опыт программ для игры авари (разновидности игры оваре, созданной в 1991 г.[565]) показал, что разница между сверхчеловеческой и идеальной игрой может быть весьма внушительна. После того как Джон Ромейн и Генри Бал полностью решили игру авари, они использовали построенные таблицы для проверки того, насколько хорошо играли программы Softwari и Marvin на Компьютерной олимпиаде 2000-го. Обе программы выполняли перебор примерно на 20 полуходов и использовали таблицы окончаний для 34 семян (фишки для игры в оваре

обычно называют семенами, поскольку традиционно для игры использовались семена цезальпинии). Анализ показал, что программа Softwari выбирала идеальный ход лишь в 87% случаев, а победитель матча Marvin и того хуже — в 82% случаев. Много раз ошибки приводили к изменению ожидаемого победителя игры, но программы не осознавали этого[566]. Однако при этом обе программы играли в авари гораздо сильнее людей.

Словом, работа команды Шеффера не была завершена — ведь шашки ещё не были решены! В 2003 г. Шефферу и его коллегам удалось создать 10-шашечные таблицы окончаний для случая 5 на 5 шашек[567], а в 2005 г. — полные 10-шашечные таблицы, а также таблицы с неполной информацией для 12-шашечных окончаний (в этих таблицах точные оценки были известны лишь для некоторой части позиций)[568].

По расчётам Шеффера, для сильного решения шашек (т. е. создания полных 24-шашечных таблиц) необходимо хранилище данных объёмом около 1000 петабайт. В 2008 г. стоимость хранилища ёмкостью 1 петабайт составляла порядка миллиона долларов (сегодня такое же хранилище стоило бы примерно в 10–15 раз меньше), что, разумеется, не укладывалось в бюджет исследовательского гранта[569]. Однако для того, чтобы получить слабое решение, достаточно было выполнить перебор лишь для некоторых поддеревьев игры таким образом, чтобы полученная в корне дерева оценка была основана только на оценке позиций, имевших точные оценки, то есть на табличных позициях или финальных позициях игры.

В таком ограниченном виде задача оказалась разрешимой, и в 2007 г. необходимые расчёты были завершены. Команде Шеффера удалось доказать, что при правильных действиях обеих сторон шашки являются ничейной игрой. Результаты были опубликованы в журнале *Science*[570] и стали одним из самых крупных научных результатов, полученных в 2007 г.[571]

Построенное системой Шеффера дерево доказательств показывает идеальные линии игры, необходимые для достижения ничьей (т. е., если одна из сторон допускает ошибку, ведущую к проигрышу, дерево не обязательно покажет, как именно можно выиграть). Также Шеффер сохранил только верхнюю часть дерева игры, включающую около 10 млн позиций. Так было сделано, потому что сохранение полного дерева доказательств, в котором каждый терминальный узел соответствует позиции из базы данных окончаний, потребовало бы многих десятков терабайт дискового пространства, которых у Шеффера не было.

Если пользователь системы запрашивает доказательство для одного из терминальных узлов этого урезанного дерева, то программа осуществляет перебор вариантов для поиска решения (в среднем такой перебор предполагает рассмотрение также около 10 млн позиций; в 2007 г. использованному Шеффером компьютеру требовалось на это в среднем около двух минут).

Основные линии игры были вручную сопоставлены с существовавшими на тот момент теоретическими анализами, выполненными людьми. В целом система Шеффера подтвердила выводы людей, обнаружив лишь несколько несущественных ошибок в человеческом анализе.

Самый длинный вариант, содержащийся в усечённом дереве решений системы Шеффера, содержит 154 полухода, а позиция, возникающая в результате этой последовательности ходов, требует анализа ещё более чем на 20 полуходов, чтобы достичь базы данных окончаний. При этом некоторые позиции в этой базе, достигнутые в результате такого анализа, предполагают продолжение игры в течение ещё пары сотен полуходов. Этот пример подтверждает сложность игры как для компьютеров, так и для людей.

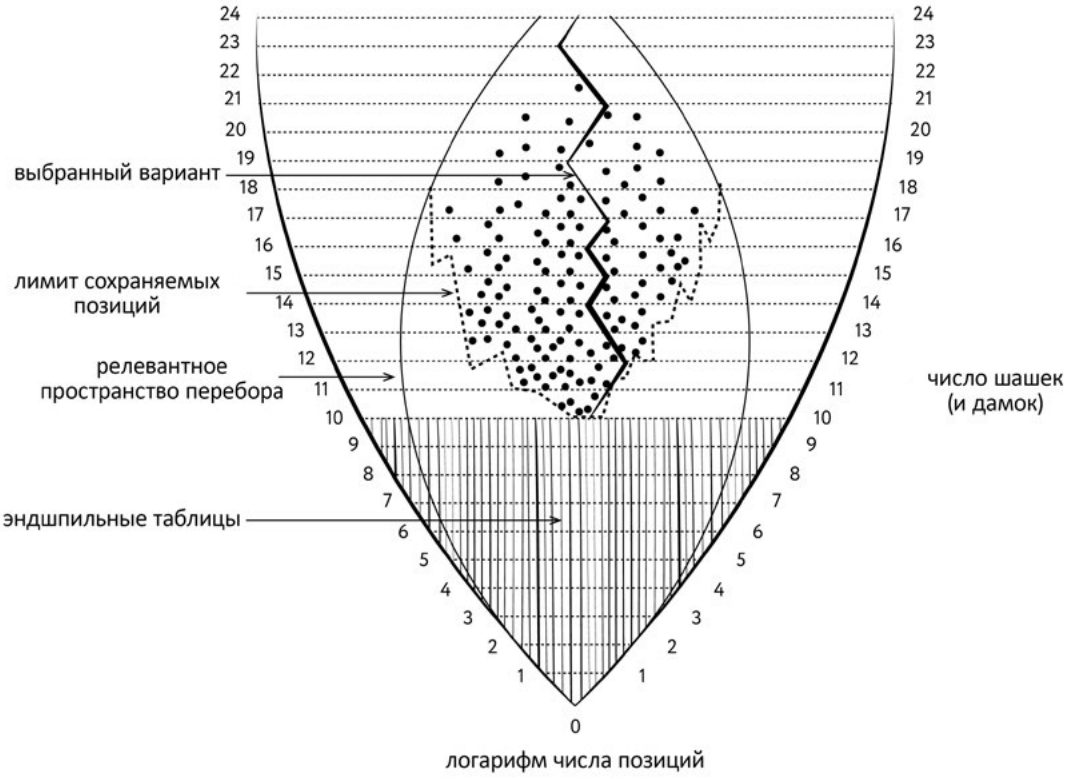


Рис. 63. Схема поиска решений для игры в шашки в хранилище позиций. По вертикали указано количество шашек (и дамок) на доске, по горизонтали — число позиций (логарифмическая шкала). Заштрихованная область — часть доказательства, покрытая эндшпильными таблицами (все позиции с десятью шашками или менее). Внутренняя овальная область — проанализированная для доказательства часть пространства перебора (без недостижимых позиций и без ненужных для доказательства позиций). Кружки обозначают позиции с более чем десятью шашками, для которых исход игры найден и подтверждён. Пунктирная линия показывает границу между сохранённой и несохранённой на диске частями дерева доказательств (при необходимости последняя вычисляется). Сплошная чёрная линия показывает «лучшую» последовательность ходов

Проект Шеффера стал триумфом переборных методов ИИ и массивных параллельных вычислений и внёс существенный вклад в оба этих направления. Аналогичные подходы в наши дни используются, в частности, при решении задач из области биоинформатики — там, где ограниченность наших знаний сочетается с большой комбинаторной сложностью исследуемых систем. Решение шашек раздвинуло границы возможного для алгоритмов, основанных на интенсивном переборе[572].

Поставлена ли таким образом точка в области компьютерных шашек? Вопрос интересный, ведь сильного решения игры до сих пор не существует. Быть может, однажды, благодаря появлению более дешёвых и объёмных хранилищ данных, а также новых продвинутых алгоритмов сжатия, эта задача также будет решена. В конце концов, трудно поверить, что такой человек, как Джонатан Шеффер, может окончательно успокоиться.

Шахматы 3.5

Мир я сравнил бы с шахматной доской:
То день, то ночь. А пешки? Мы с тобой.
Подвигают, притиснут и — побили.
И в тёмный ящик сунут на покой.

Омар Хайям

Шахматные автоматы и механизмы 3.5.1

Машина, играющая в шахматы, — этот образ давно занял в массовой культуре место одного из наиболее узнаваемых символов искусственного интеллекта. Многие книги и статьи, посвящённые искусственному интеллекту вообще или компьютерным шахматам в частности, не обходятся без изображения антропоморфного автоматона в турецком тюрбане, восседающего за шахматной доской. Интернет-портал, созданный компанией Amazon для разметки людьми массивов данных для задач машинного обучения, получил название Amazon Mechanical Turk. В честь того же «турка» получили имена сразу несколько шахматных программ, например программа Mr. Turk Гари Буса и Джеймса Мундстока из Миннесотского университета, The Turk турецкого программиста Якупа Ипека, шахматный робот Raspberry Turk Джоуи Мейера и шахматная программа The Turk, созданная Ингви Бьёрнссоном и Андреасом Юнгхансом — учениками Джонатана Шеффера, того самого, под руководством которого удалось создать идеального игрока в шашки.

Итак, первый шахматный «автомат», созданный придворным инженером Вольфгангом фон Кемпеленом, был продемонстрирован в Вене в 1769 г. Устройство представляло собой выполненную в натуральную величину восковую фигуру, одетую в экзотический турецкий наряд и сидящую за деревянным ящиком (1,2 × 0,6 × 0,9 м) с шахматной доской на крышке. Перед началом игры дверцы ящика раскрывались, и при помощи свечи публике демонстрировался сложный бутафорский механизм. Вслед за этим дверцы закрывались, механизм заводился ключом, и начиналась игра, которую за автомат вёл спрятанный в ящике сильный шахматист[573]. «Турок» умел не только играть в шахматы, но и общаться со зрителями, указывая рукой на буквы, изображённые на специальной

табличке на поверхности стола. В отличие от современных чат-ботов Автомат не испытывал проблем с прохождением теста Тьюринга.

Вольфганг фон Кемпелен, венгр по происхождению, занимал при дворе Марии Терезии высокие государственные посты советника казначейства и управляющего соляной промышленностью, составлявшей государственную монополию. Пользуясь ресурсами, свойственными его высокому положению, он создал множество интересных приспособлений и конструкций: пишущий набор для незрячих, паровую машину, гидравлическую систему фонтанов во дворце Шёнбрунн. Богатство венского двора располагало к созданию невиданных диковинок, способных потешить пресыщенную придворную аристократию.

Вот как описывает встречу с «турком» современник фон Кемпелена, писатель и журналист Карл Готлиб фон Виндиш:

Первой мыслью, возникшей после поверхностного осмотра Шахматного Игрока, стало подозрение, что его движения находятся под непосредственным руководством какого-то человека. От этой ошибки я не был освобождён сам; когда я впервые увидел, как изобретатель извлекает из алькова свой Автомат, прикреплённый к довольно большому сундуку, я, как и другие, сразу же заподозрил, что этот сундук достаточно большой, чтобы в нём уместился ребёнок — как я оценил, прикинув размеры, — лет десяти или постарше. Некоторые говорили об этом вслух, и я про себя соглашался с ними. В ответ на это фон Кемпелен поднял одежду Автомата, вытащил выдвижной ящик и открыл все двери сундука. Перемещая открытый Автомат на четырёх колёсиках, изобретатель повернул его во всех направлениях и позволил каждому присутствующему осмотреть Автомат со всех сторон.

Я, как вы можете догадаться, не оставил без внимания ни малейшего уголка и тем не менее не обнаружил ни одного места, где можно было бы спрятать хотя бы шляпу. Моё самолюбие было весьма уязвлено, когда я увидел, как растворяется догадка, которая поначалу казалась мне столь гениальной.

Я не знаю, думали ли остальные зрители так же, как и я; мне во всяком случае показалось, что некоторые думали о сверхъестественных силах. Одна старая дама, припомнив сказки, которыми её развлекали в детстве, перекрестилась и отошла подальше к окну, чтобы быть подальше от злого духа, присутствие которого она чувствовала[574].

В 1805 г., через год после смерти Кемпелена, его сын уступил «турка» немецкому инженеру Иоганну Мельцелю за 10 000 франков (по покупательной способности эта сумма примерно равна 5 млн рублей в 2023 г.)[575] — половину от суммы, за которую ранее Кемпелен предлагал Мельцелю приобрести устройство.

Мельцель внёс в Автомат ряд доработок. Например, добавил в него механизм, способный произвести слово «шах!» (Échec!)[576].

В 1811 г. Мельцель привёз «турка» в Милан для выступления перед вице-королём Италии Евгением Богарне. Богарне так понравился Автомат, что тот уговорил Мельцеля уступить его за 30 000 франков. Впрочем, через несколько лет, после окончания Наполеоновских войн, когда Евгений Богарне вместо вице-короля Италии стал герцогом Лейхтенбергским, Мельцель посетил его в Мюнхене и выкупил «турка» обратно[577].

Мельцель с большим успехом демонстрировал Автомат в различных странах Европы. Некоторые источники, расходясь, впрочем, в деталях, сообщают даже о поединке Автомата с Наполеоном, в котором император был разгромлен за шахматной доской.

В 1826 г. Мельцель перебрался в Новый Свет, где продолжались выступления.

В разное время операторами Автомата были Иоганн Альгайер, Уильям Льюис, Уильям Шлюмберже и другие сильные шахматисты. Но самым известным оператором «турка» стал Жак Муре, внучатый племянник знаменитого шахматиста Филидора[578].

Пятьдесят игр Автомата во время Лондонской выставки 1819-го, на которой оператором устройства был Муре, были собраны в опубликованной в следующем году книге. В предисловии говорилось, что к февралю 1820 г. (дата публикации книги) Автомат сыграл около трёхсот игр, давая противникам фору в одну пешку и право первого хода, при этом проиграл всего шесть партий[579].

Слабость Муре к алкоголю часто оставляла его без гроша, и, чтобы выжить, он, вероятно, открыл изданию *Le Magasin pittoresque* тайну «турка»: в вышедшей в 1834 г. статье под названием «Автоматический шахматист» объяснялось, как человек обычного роста может играть в шахматы, находясь внутри устройства, и раскрывалось имя одного из операторов автомата — Аарона Александра[580]. Статья была опубликована анонимно, но по некоторым косвенным данным можно предположить, что источником был именно Муре. В это время французский мастер был болен, ему не хватало денег, и он умер три года спустя[581].

Впрочем, профессиональные механики догадывались о принципах устройства Автомата и раньше. В 1820 г. свет увидела брошюра под названием «Попытка анализа автоматического шахматиста м. Кемпелена» за авторством английского учёного и инженера-механика Роберта Уиллиса, в которой автор подробно описывает возможное устройство «турка», снабжая рассуждения чертежами[582].

В 1838 г. Мельцель скончался от отравления алкоголем, после чего Автомат перешёл в руки американского врача и писателя Джона Митчелла, а затем оказался в Китайском музее Натана Данна, известного под названием «10 000 китайских вещей», в Филадельфии, где и сгорел во время пожара в 1854 г.

В 1857 г. в двух первых номерах журнала *The Chess Monthly* (Ежемесячные шахматы) вышла статья Силаса Митчелла, сына Джона Митчелла, в которой было подробно описано устройство «турка»[583].

Игрок, плотно втиснутый в ящик, не мог напрямую наблюдать за ходом игры. Эту проблему Кемпелен решил с помощью сигнализационной

системы. В основание фигур, установленных на доске, были вмонтированы магнитные стержни. Под каждым полем доски внутри ящика находился небольшой железный грузик, подвешенный на медной пружинке. Когда фигуру поднимали, грузик опускался, сигнализируя о её перемещении. Как только фигура оказывалась на новом поле, магнит притягивал соответствующий грузик. Руководствуясь движениями грузиков, шахматист перемещал фигуры на своём экземпляре шахматной доски, закреплённой на одной из внутренних стенок ящика. Для того чтобы совершить ход, оператор передвигал рычаг, заставляя руку «турка» опускаться над заданной точкой доски. В руке манекена находились гибкие тросики, которые управлялись движениями пальцев оператора. Вращая втулку на конце рычага, шахматист брал фигуру, переносил её на нужное поле, разжимал пальцы и возвращал руку в исходное положение[584].

Впрочем, публикация статьи Митчелла не помешала появлению позже удивительных историй о «турке». Не обошлось и без русского следа. Французский иллюзионист Жан Робер-Уден — именно в его честь знаменитый Гарри Гудини выбрал свой сценический псевдоним — поведал в мемуарах 1859 г. собственную историю происхождения «турка». Согласно Роберу-Удену, фон Кемпелен был в России в 1790-х гг., где встретил доктора по фамилии Ослофф (Osloff). Доктор приютил беглого польского солдата Воровского (Worousky), у которого пушечным ядром оторвало ноги. Пострадавший солдат был одарённым шахматистом. Узнав об этом, фон Кемпелен сделал то, что любой сделал бы в подобной ситуации: потратил три месяца на создание мошеннического человекоподобного автоматического шахматного игрока, снабжённого ящиком, достаточно большим, чтобы вместить Воровского, в котором и вывез его тайно из России[585]. Наверняка так оно всё и было.

Успех фон Кемпелена и Мельцеля породил череду подражаний. В 1797 г. свой «автомат» представил итальянец Джузеппе Мороси[586, 587]. Впрочем, аппарат играл слабо и медленно и особого успеха не имел. «Баварский мальчик», выставлявшийся в Мюнхене в 1820 г., умел играть и в шахматы, и в шашки. В 1827 г. увидел свет «американский шахматный игрок», созданный братьями Уокер (Walker Brothers). Мельцель хотел выкупить этот «автомат», чтобы избежать конкуренции. Уже после смерти Мельцеля появился «Аджиб» (Ajeeb), созданный Чарльзом Хупером и впервые продемонстрированный в 1862 г. Аппарат играл в шашки и шахматы и добился особых успехов, когда его оператором был знаменитый шахматист Пильсбери. За Аджибом последовал созданный Чарльзом Гюмпелем «Мефисто», играя за которого Гунсберг выиграл среди прочего партию у Чигорина — каждый из противников допустил в партии несколько ошибок, но ошибка Чигорина оказалась последней[588]. В общем, забраться в бутафорский автомат и потроллить почтенную публику было одним из весьма популярных развлечений великих шахматистов прошлого.

Созданное фон Кемпеленом устройство, конечно же, не являлось системой искусственного интеллекта, но любопытно то, что с его помощью

удавалось весьма успешно вводить в заблуждение современников изобретателя. Люди верили, что искусный мастер мог создать механизм, способный играть в шахматы. Это вполне соответствовало настроениям эпохи Просвещения. Рене Декарт считал животных сложными машинами, а Томас Гоббс в своём знаменитом «Левиафане» (1651)[589] развивает идею о том, что мышление имеет механическую, комбинаторную природу. Лейбниц считал, что человеческий разум можно свести к чисто механическим вычислениям, предположив, что для мыслящих машин более всего подойдёт двоичная логика. Велика ли с точки зрения человека, живущего на границе XVIII и XIX вв., была дистанция от механической утки Вокансона до механического игрока в шахматы?

Забавно, что первая машина, действительно умевшая самостоятельно играть в шахматы, известна публике в куда меньшей степени, чем Автомат фон Кемпелена. В начале 1910-х (источники разнятся в точной датировке, иногда говорится даже о 1890-х)[590, 591, 592, 593] испанский математик и инженер Леонардо Торрес-и-Кеведо создал автомат под названием El Ajedrecista (в переводе на русский — «шахматный игрок»). Машина произвела настоящий фурор во время своего дебюта, состоявшегося в 1914 г. на выставке, организованной Парижским университетом[594].

Конечно, шахматная машина Торреса-и-Кеведо не умела играть в полноценные шахматы. Используя механические манипуляторы и электрические сенсоры, автомат умел ставить белыми королём и ладьёй (расположенными в начальной позиции на полях a8 и b7 соответственно) мат одинокому чёрному королю, управляемому человеком (король в начальной позиции мог находиться на любом поле, исключая седьмую и восьмую горизонтали). Кроме того, машина умела определять корректность ходов, совершаемых игроком. Если человек совершал невозможный ход, машина сигнализировала об ошибке при помощи лампочки. Если игрок допускал три ошибки, игра останавливалась.

В силу простоты использованного алгоритма автомат не гарантировал осуществления мата за минимально возможное количество ходов, но тем не менее неизменно ставил мат вне зависимости от защиты противника.

Поскольку автомат Торреса-и-Кеведо появился раньше «Ниматрона» Кондона, именно он стал первым в истории игровым компьютером. Конечно, расстояние от El Ajedrecista до машины, способной играть в полноценные шахматы, было очень велико, но в то же время автомат Торреса-и-Кеведо стал важным доказательством жизнеспособности самой концепции.

Вторую, улучшенную механически, но не алгоритмически, версию автомата изготовил в 1920 г. Гонзало, сын изобретателя, под руководством отца. Новая версия машины использовала электромагниты для перемещения фигур на доске, а также фонограф, чтобы «произносить» слова «шах» и «мат»[595]. Уже после смерти старшего Торреса-и-Кеведо, на Парижском конгрессе по кибернетике в 1951 г., улучшенная машина предстала перед более широкой аудиторией[596]. С её устройством ознакомился Норберт Винер,

о чём свидетельствует фотография, запечатлевшая Гонзало, демонстрирующего Винеру работу машины.

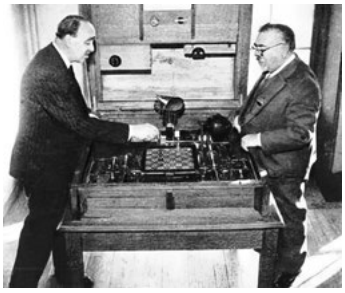
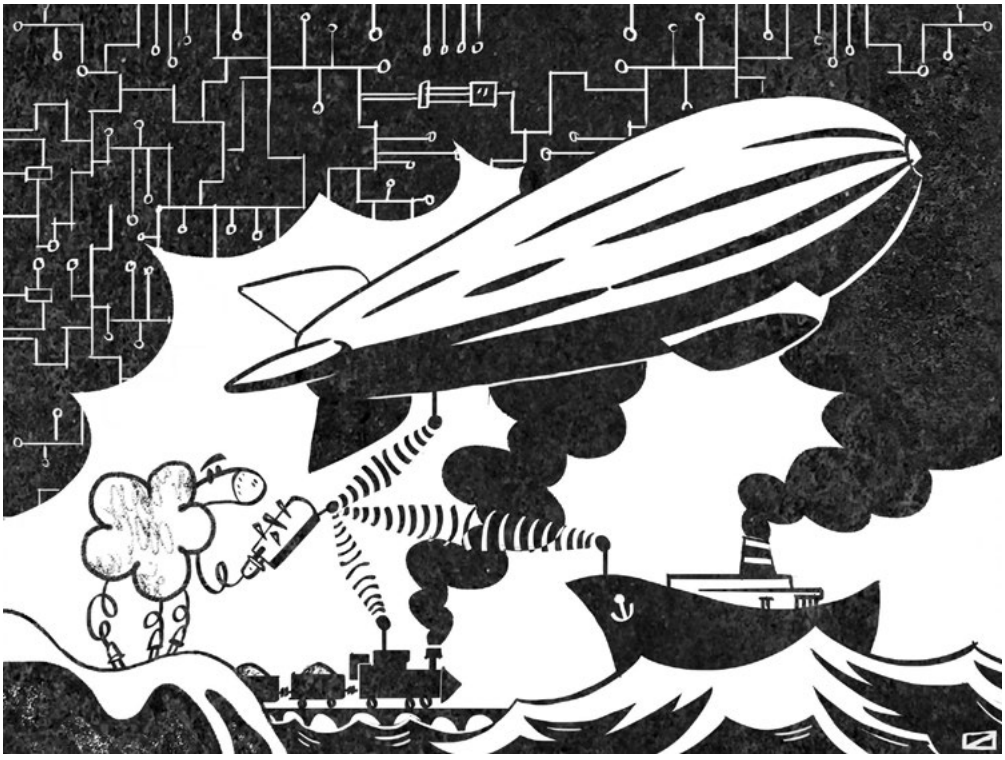


Рис. 64. Гонзало Торрес-и-Кеведо демонстрирует Норберту Винеру работу машины El Ajedrecista

Оба автомата и сегодня пребывают в рабочем состоянии и выставлены в музее Леонардо Торреса-и-Кеведо, расположенном в здании Высшей технической школы инженеров дорог, каналов и портов (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, ETSICCP) при Политехническом университете Мадрида[597].

За свою жизнь Леонардо Торрес-и-Кеведо создал множество замечательных устройств. На стометровой высоте над рекой Ниагарой в провинции Онтарио (Канада), рядом с легендарным Ниагарским водопадом, и в наши дни действует канатная дорога Whirlpool Aero-Car, созданная по чертежам изобретателя и запущенная в эксплуатацию в 1916 г. Леонардо и его сын Гонзало лично руководили её постройкой. Это не единственная канатная дорога Торреса-и-Кеведо. В 1907 г. была запущена пассажирская канатная дорога на горе Улия (Доностия-Сан-Себастьян, Испания) (в некоторых источниках она называется первой в мире пассажирской канатной дорогой,



но в данном случае приоритет, по всей видимости, всё-таки принадлежит или гибралтарской, или гонконгской канатной дороге, построенным в конце XIX в.[598]). Другие канатные дороги, спроектированные Торресом-и-Кеведо, были построены в Шамони (сегодня — Шамони-Мон-Блан, Франция) во Французских Альпах и в Рио-де-Жанейро (Бразилия)[599].

К числу других изобретений Торреса-и-Кеведо относится пульт дистанционного управления. Удивительный гений испанского Леонардо был столь велик, что ему удалось изобрести пульт задолго до изобретения телевизора. Ну а если серьёзно, то «телекин» (Telekine), запатентованный Торресом-и-Кеведо в 1903 г., стал одной из первых разработок в этой области. При помощи телекина Торрес-и-Кеведо без использования проводов успешно управлял дирижаблями[600], трёхколёсным мотоциклом и лодкой[601, 602].

В 1913 г. из-под пера Торреса-и-Кеведо вышла статья под названием «Очерки об автоматике» (Ensayos sobre Automática), в которой, собственно, впервые был употреблён термин «автоматика». В статье Торрес-и-Кеведо приводит краткую историю трудов Чарльза Бэббиджа по созданию разностной и аналитической машин. Леонардо пишет об аналитической машине как о проекте, раскрывающем потенциальные возможности машин, и рассматривает задачу её постройки как вызов своим навыкам конструктора электромеханических устройств. Статья содержит полное описание конструкции машины, способной вычислять значение выражения $a^x (y - z)^2$ для последовательности наборов значений переменных.

Торрес-и-Кеведо демонстрирует хитрые электромеханические устройства (коммутаторы, электромагниты и т. д.), предназначенные для хранения десятичных цифр, выполнения арифметических операций с использованием таблиц встроенных функций и для сравнения значений двух величин. Машина управляется системой условного ветвления, заданной в виде рисунка проводящих областей на поверхности вращающегося барабана. Схема машины содержит первую электромеханическую реализацию арифметики с плавающей запятой.

В 1920 г. на конференции, посвящённой столетию создания арифмометра де Кольмара, Торрес-и-Кеведо представил электромеханический арифмометр собственной конструкции. Оператор печатал на пишущей машинке числа, разделённые знаком арифметической операции, после чего арифмометр выполнял вычисление и подавал машинке команду напечатать ответ и перевести каретку на следующую строку для осуществления очередной операции[603].

Шахматные программы... без шахматных машин 3.5.2

Первая машина, способная играть в шахматы в полном соответствии со всеми правилами, появилась на свет почти через полвека после создания «шахматного игрока».

Но, что ещё интереснее, первая программа для игры в шахматы появилась задолго до того, как появилась машина, способная её выполнять! И ответственен за столь необычную веху в истории ИИ — Алан Тьюринг.

После окончания Второй мировой войны Тьюринг работал в Национальной физической лаборатории (NPL), где занимался разработкой одного из первых компьютеров — «Автоматического вычислительного механизма» (Automatic Computing Engine, ACE) — предшественника Manchester и Ferranti Mark I. В 1945 г. в отчёте Тьюринга под названием «Предлагаемый электронный калькулятор» упоминается десять задач, которые могли бы быть решены при помощи ACE; последней в списке значится программа для игры в шахматы[604]. Идея была развита в 1948 г. в следующем отчёте под названием «Интеллектуальная техника», в котором Тьюринг упоминает проведённые им эксперименты в этом направлении[605]. Считается, что первые идеи Тьюринга в отношении компьютерных шахмат относятся к 1941–1942 гг.[606]

В конце лета 1948 г. Тьюринг вместе со своим коллегой Дэвидом Чемпернауном разработали алгоритм определения хода в шахматной игре на основе перебора вариантов. Однако он был слишком сложен для того, чтобы воплотить его в виде программы для ACE или любого другого компьютера того времени. Программа получила название «Тьюрочемп» (Turochamp), составленное из первых букв фамилий авторов. Вооружившись карандашом и бумагой, авторы выполняли необходимые расчёты за машину вручную — на выбор одного хода уходило около 30 минут. Этот аттракцион получил название «бумажной машины». «Бумажная машина» оказалась способна обыграть начинающего игрока — жену Чемпернауна, но проиграла Алику Гленни, создателю первого в истории компилятора — Autocode. Партия «бумажной машины» против Гленни продолжалась 29 ходов и сохранилась до наших дней[607].

Хотя Чемпернаун в 1980 г. и описал алгоритм работы программы в письме в редакцию журнала *Personal Computing*, некоторые детали за три десятилетия стёрлись из памяти учёного[608]. К счастью, до нас дошло достаточно подробное описание алгоритма Turochamp, подготовленное самим Тьюрингом для вышедшего в 1953 г. сборника «Быстрее мысли: симпозиум по цифровым вычислительным машинам» (Faster than Thought: A Symposium on Digital Computing Machines) под редакцией Бертрама Баудена[609]. Текст, набранный на печатной машинке, содержит собственноручные пометки и исправления Тьюринга. Выбор хода в программе Тьюринга и Чемпернауна был основан на переборе вариантов на фиксированную глубину. При этом варианты со

взятиями рассматривались в глубину вплоть до позиций, в которых ни одно взятие было невозможно. Оценочная функция Turochamp оценивала материал (конь оценивался в три пешки, слон — в три с половиной, ладья — в пять и ферзь — в десять пешек), мобильность фигур, а также некоторое количество других позиционных признаков[610].

В 2004 г., основываясь на имеющихся материалах, Фредерик Фридель — известный научный журналист, многолетний редактор журнала *Computerschach und Spiele* (Компьютерные шахматы и игра) и сооснователь компании ChessBase, — заручившись поддержкой одного из ведущих разработчиков ChessBase Матиаса Файста, воссоздал Turochamp в виде работающей программы. Таким образом, спустя более чем полстолетия программа Тьюринга наконец обрела компьютерное «тело».

В процессе работы над Turochamp команда ChessBase столкнулась с проблемой: программа отказалась повторять все ходы, записанные Тьюрингом в игре против Гленни. Исследователи потратили несколько недель на повторное изучение материалов Тьюринга и обсуждение особенностей их реализации. К работе команды подключился Кен Томпсон, который написал собственный код на основе инструкций Тьюринга. Но и его программа вела себя сходным образом и повторяла большую часть ходов программы ChessBase, отличавшихся от ходов Тьюринга в партии.

В чём же было дело? Были ли это ошибки Тьюринга или неточности реконструкторов?

Фридель связался с Дональдом Мичи, работавшим с Тьюрингом в Блетчли-парке, описал суть проблемы и рассказал о наиболее существенных расхождениях между ходами в партии и ходами программы. *«Возможно, мы делаем что-то не так,* — писал Фридель, — *но я сомневаюсь в этом, поскольку очень часто, особенно в начале игры, мы получаем те же ходы с одинаковыми оценками. Думаю, вполне возможно, что Тьюринг устал после пятнадцати ходов, когда вдобавок ко всему позиция стала достаточно сложной?!»* Реакция Мичи была следующей: *«Вы ищете ошибку в программе, Фредерик? Нет-нет, вы должны искать её у Алана Тьюринга! Алан не заботился о деталях; его интересовал общий принцип»*. Он также привёл слова Чемпернауна, который помогал Тьюрингу в создании «бумажной машины»: *«В натурном эксперименте, я подозреваю, мы были слегка небрежны и наверняка наделали множество ошибок, поскольку расчёты были чрезвычайно утомительны при использовании карандаша и бумаги»*.

Результаты работы по воссозданию Turochamp были представлены на конференции, прошедшей в Блетчли-парке 23 июня 2012 г. и посвящённой столетию со дня рождения Алана Тьюринга. Вместе с Фриделем на конференции выступил тринадцатый чемпион мира по шахматам Гарри Каспаров, который провёл короткую демонстрационную партию против Turochamp — играя чёрными, он выиграл её за 16 ходов[611].

До своей трагической смерти в 1954 г. Тьюринг так и не успел реализовать Turochamp в виде программного кода, но эстафету подхватили другие

3.5.2

Шахматные программы... без шахматных машин

исследователи. Вообще говоря, шахматы с самого начала рассматривались в качестве своеобразного священного Грааля машинного интеллекта — эта традиция берёт истоки ещё в работах Бэббиджа. Конрад Цузе, работая над своим языком программирования Plankalkül, анализировал задачу определения валидности шахматных ходов и разработал для этого ряд программных процедур[612, 613]. В 1950 г. опубликована написанная двумя годами ранее программная статья Клода Шеннона «Программирование компьютера для игры в шахматы», в которой сформулированы основные подходы к созданию шахматных программ, в значительной мере определившие развитие шахматного программирования в последующие полстолетия.

В целом идеи, изложенные Шенноном в статье, во многом пересекаются с идеями Тьюринга. Шеннон также предлагает использовать оценочную функцию, принимающую в расчёт материал, мобильность, отдельные элементы пешечной структуры: слабые, изолированные и сдвоенные пешки, нахождение ладей на открытых вертикалях и некоторые другие широко известные признаки, используемые шахматистами при оценке позиции. Интересно, что Шеннон предлагает немного отличающиеся значения для оценки фигур (у Тьюринга слон стоит три с половиной пешки, а у Шеннона — три, как и конь). Шеннон также пишет о том, что перебор в узле дерева можно прерывать только в «спокойных» [quiescent] позициях, поскольку значение оценочной функции бессмысленно в середине цепочки разменов. Если при переборе в глубину на три полухода белые третьим полуходом взяли чёрного ферзя, то программа может посчитать результатом соответствующего варианта выигрыш ферзя, хотя в действительности чёрные заберут «лишнего» ферзя белых следующим ходом, тем самым уравняв позицию. Термин *quiescent*, употреблённый Шенноном, и в наши дни используется для обозначения в шахматных программах функций, отвечающих за анализ форсированных вариантов, например: quiescence_search() или просто quiescence(). Шеннон по сути приводит в статье свой вариант этой функции: он предлагает продолжать перебор в течение нескольких дополнительных полуходов, если хотя бы одна фигура на доске атакована более слабой фигурой, либо атакована недостаточно защищённая фигура, либо существует возможность дать шах на незащищённое поле.

Вообще статья Шеннона интересна в первую очередь как раз анализом задачи перебора вариантов. Шеннон описывает две программы — тип *A* и тип *B*. Программа типа *A* просматривает дерево игры на фиксированную глубину, при этом в каждом узле дерева (соответствующем позиции на доске) рассматриваются все возможные ходы соответствующей стороны. Такой подход гарантирует нахождение любой игровой комбинации, если глубина рассмотрения дерева достаточна для этого. Однако дерево шахматной игры, особенно в миттельшпиле, ветвится чрезвычайно быстро. В среднестатистической шахматной позиции возможно примерно 35 различных полуходов, что более чем в десять раз превосходит аналогичный показатель для английских шашек. Оценив вычислительные возможности машин, Шеннон делает

неутешительный вывод: программа типа *A* вряд ли когда-либо сможет сравниться с лучшими шахматистами, ведь некоторые комбинации чемпионов мира насчитывают 15–20 ходов в глубину! В качестве альтернативы программе типа *A* Шеннон предлагает программу типа *B*, которая будет рассматривать в каждом узле дерева игры не все, а только некоторые альтернативы — это позволит увеличить глубину рассмотрения дерева за счёт уменьшения его ширины. Похожим образом действуют и профессиональные шахматные игроки — включают в рассмотрение только те варианты, которые считают осмысленными.

Дьявол, однако, как обычно, кроется в деталях. В 1950 г. в арсенале методов ИИ ещё не было инструментов, позволявших получить оценку «осмысленности» того или иного варианта, сопоставимую по качеству с человеческой. Да что уж говорить — даже самого ИИ как направления ещё не существовало. Программа типа *B*, руководствуясь примитивными способами отсеивания вариантов, неизбежно часто допускала бы грубые ошибки, эту проблему видел и Шеннон. Последовавшие десятилетия развития шахматных программ во многом стали поиском разумного компромисса между полным и селективным, избирательным перебором вариантов, а также поиском быстрых и в то же время «умных» оценочных функций.

В своей работе Шеннон рассматривает возможность ограничения количества вариантов, анализируемых на каждом из уровней дерева перебора. Например, на картинке ниже изображено дерево с ограничениями числа рассматриваемых вариантов в 3, 2, 2, 1, 1 для глубины соответственно в 1, 2, 3, 4 и 5 полуходов. Сплошными линиями показаны «разрешённые» к рассмотрению ходы, штриховыми — «запрещённые».

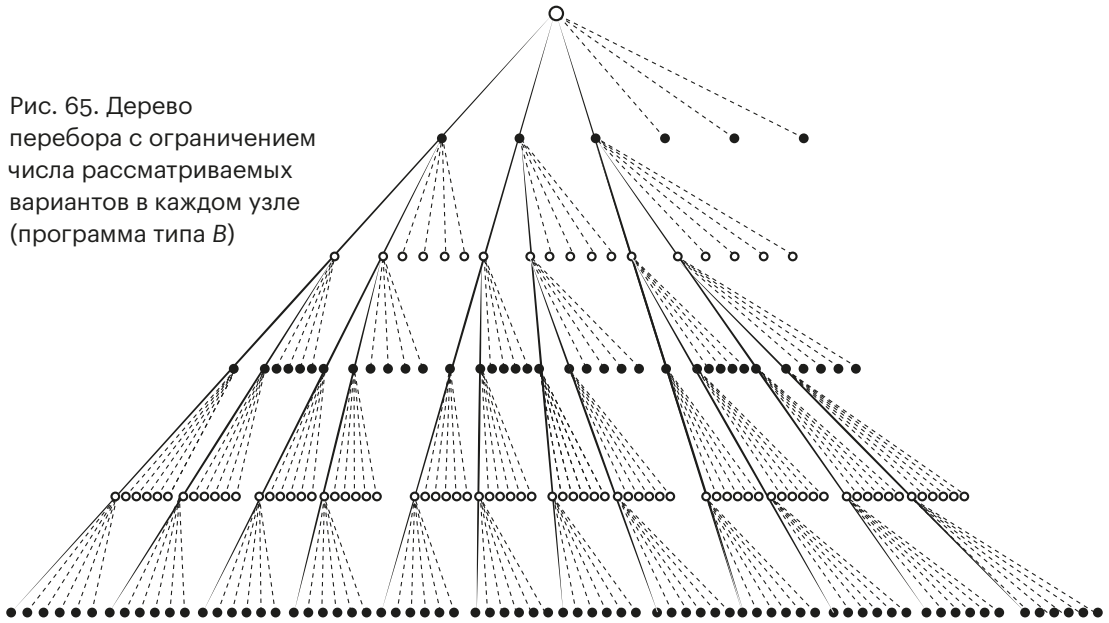


Рис. 65. Дерево перебора с ограничением числа рассматриваемых вариантов в каждом узле (программа типа *B*)

3.5.2

Шахматные программы… без шахматных машин

Количество рассматриваемых вариантов на этой схеме зависит только от глубины и не зависит от качества соответствующей позиции и самих ходов — это, конечно, серьёзное упрощение. В действительности Шеннон предлагал разработать некоторую функцию $h(P, M)$, где P — позиция, а M — ход, для определения того, достоин ли ход рассмотрения в данной позиции. Шеннон даже выполнил некоторые наброски такой функции: предложил присваивать большие значения шахам, развивающим ходам, взятиям, атакам на фигуры, угрозам мата и так далее[614].

В статье Шеннона обнаружилось достаточно деталей для того, чтобы уже знакомый нам Матиас Файст создал на её основе «программу Шеннона». Инго Альтхофер из Йенского университета в 2012 г. организовал демонстрационный матч из десяти партий, в котором «программа Тьюринга» сразилась с «программой Шеннона». Итогом матча стала ничья — каждая из программ выиграла по одной партии, а остальные восемь завершились миром. До последней партии «Тьюринг» лидировал, но последнюю выиграл «Шеннон», сравняв счёт. Причиной поражения «Тьюринга» стал эффект горизонта. Также в ходе матча выяснилось, что ни одна из программ не способна поставить «голому» королю мат ни ладьёй, ни даже ферзём[615].

Сегодня исходные коды «воссозданных» программ Тьюринга и Шеннона, так же как и, например, исходные коды программы, основанной на отдельных идеях Конрада Цузе, размещены в открытом доступе. Однако важно понимать, что все они содержат некоторый произвол со стороны реконструкторов, ведь ни одна из этих программ не существовала в действительности, а дошедшие до нас документы допускают в ряде случаев весьма широкое пространство для трактовок и домыслов.

Интересно, что Turochamp не была единственной «бумажной машиной» того времени. В 1947–1948 гг. уже знакомый нам Дональд Мичи совместно с другим криптоаналитиком из Блетчли-парка Шоном Уайли создали программу, а точнее, алгоритм, получивший название «Макиавелли» (Machiavelli). Это имя он получил в честь знаменитого итальянского мыслителя, писателя и политического деятеля эпохи Возрождения Никколо Макиавелли. В начале 1950-х гг. Тьюринг вёл работы по превращению Turochamp и Machiavelli в программы для манчестерских компьютеров, но эта работа так и осталась незавершённой. Исторические Machiavelli и Turochamp так и не сыграли ни одной партии, пока до них не добрались неутомимые реконструкторы.

В статье «Машины, которые играют в игры», увидевшей свет в 1961 г., Джон Мейнард Смит и Дональд Мичи описали оценочные функции своих алгоритмов — SOMA (Smith One-Move Analyzer, «Одноходовый анализатор Смита») и Machiavelli. Обе «бумажные машины» предполагали анализ вариантов всего на один полуход в глубину, поэтому вряд ли могли обыграть кого-то, кроме шахматных новичков. Функции оценки включали в себя подсчёт материала, контроль над центром доски и полями, соседствующими с королём, атаки на фигуры, оценки разменов и ряд других стратегических

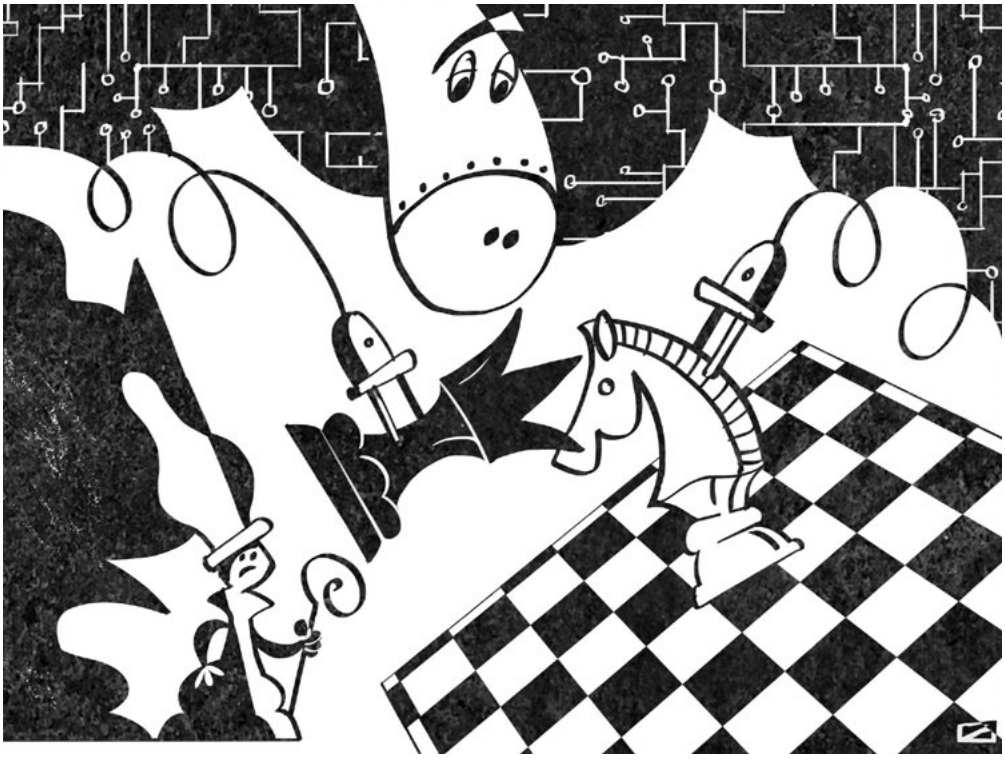
и тактических факторов. Позже Смит создал гибрид SOMA и Machiavelli, получивший название SOMAC. Этот алгоритм при переборе в глубину на два полухода обеспечивал уровень игры, соответствующий среднему шахматному игроку-любителю.

3.5.3 Алекс Бернстайн и первая полноценная шахматная программа

В 1951 г. ещё один коллега Тьюринга, Дитрих Принц, создал первую программу для Ferranti Mark I, способную решать задачки типа «мат в два хода». Было ясно, что созданию полноценной шахматной программы мешает недостаточный объём памяти машины.

Манчестерская команда не была единственной группой программистов, работавших над созданием шахматных программ в 1950-е. За океаном собственную разработку вели физики-атомщики из Лос-Аламоса под руководством самого фон Неймана.

Шахматная программа для компьютера MANIAC I (Mathematical Analyzer, Numerical Integrator, and Computer или Mathematical Analyzer, Numerator, Integrator, and Computer, «Математический анализатор, числовой интегратор



3.5.3

Алекс Бернстайн и первая полноценная шахматная программа

и компьютер» или «Математический анализатор, счётчик, интегратор и компьютер»), спроектированного и построенного командой из Лос-Аламоса, была готова к 1956 г. и умела играть в так называемые антиклерикальные шахматы — вариант шахмат на доске 6 × 6 и без слонов (дело в том, что эта фигура в английском языке называется словом *bishop* — епископ). Также в антиклерикальных шахматах не было рокировки и ходов пешек через одно поле.

Позже эта программа получила название Los Alamos Chess.

Интерес к шахматному программированию проявляли и исследователи социалистических стран. В 1953 г. в ГДР в журнале *Funk und Ton* (Радио и звук) была опубликована работа Гюнтера Шлибса с описанием алгоритма работы шахматной программы. Идеи Шлибса в целом повторяли идеи Шеннона и Тьюринга: он воспроизводит в своей работе оценочную функцию из статьи Шеннона, включающую оценку материала (девять единиц за ферзя, пять — за ладью, по три — за коня и слона), наличие отсталых, изолированных и сдвоенных (штраф по 0,5 балла) пешек, а также мобильности (по 0,1 балла за каждое поле). Перебор в программе Шлибса, как и в программе Шеннона, должен был осуществляться на фиксированное число полуходов в глубину, а оценка — производиться только в стабильных позициях. В общем, Шлибс почти полностью воспроизводит в своей работе статью Шеннона, внося ряд замечаний и уточнений[616].

Рис. 66. Учёные из Лос-Аламоса Пол Штейн (слева) и Ник Метрополис (справа) играют в шахматы с MANIAC I (на заднем плане)

Работа Шлибса не упоминается в современной западной литературе, но была хорошо известна советским исследователям. Краткий пересказ идей Шеннона и Шлибса мы впервые находим в книге «Электронные цифровые машины» Анатолия Ивановича Китова — руководителя головного вычислительного центра Министерства обороны СССР. Эта книга стала первой «открытой» книгой по вычислительной технике в Союзе, была позднее переведена на ряд иностранных языков и опубликована в Китае, Польше, Чехословакии. Пересказывая идеи Шлибса и Шеннона, Китов не удержался от того, чтобы скорректировать величину штрафа за изолированную и сдвоенную пешку: в его книге они составляют 0,4 и 0,3 балла соответственно (вместо 0,5 за оба дефекта у Шеннона и Шлибса)[617].

Два года спустя увидела свет новая книга Китова, написанная в соавторстве с Николаем Криницким, — «Электронные вычислительные машины» (в этой книге, вышедшей в «тёплые ламповые времена», слово «алгоритм» пока ещё пишется через Ф — «алгорифм»), в которой уже упоминаются

первые проекты советских программистов. Например, созданная В. М. Курочкиным программа, способная решать шахматные задачи, а также созданная В. Д. Кукушкиным программа, способная ставить мат одинокому королю двумя разнопольными слонами[618, 619]. Откровенно говоря, первой моей мыслью, когда я увидел эти фамилии в книге Китова, было то, что за птичьими псевдонимами в данном случае скрывались засекреченные сотрудники ИТМиВТ, во главе которого стоял ещё один, уже известный нам исследователь с «крылатой» фамилией — Сергей Алексеевич Лебедев. В мемуарах его коллег упоминается программа для БЭСМ, которая решала двух- и трёхходовые задачи намного быстрее, чем лучшие шахматисты института[620]. Но красивая версия не выдержала проверки: по крайней мере Владимир Михайлович Курочкин — вполне реальный человек, известный российский учёный в области информатики, стоявший у истоков отечественного программирования. С 1950 по 1955 г. Курочкин работал под началом Лебедева в ИТМиВТ, а затем возглавил отдел систем математического обеспечения Вычислительного центра РАН.

Несмотря на все усилия исследователей, первая полноценная шахматная программа появилась только в 1957 г. Её создала команда под руководством сотрудника компании IBM Алекса Бернстайна.

Написание шахматной программы в конце 1950-х гг. было сложной задачей. Во-первых, языки программирования находились в зачаточном состоянии. Язык программирования фортран (FORTRAN) был огромным шагом вперёд по сравнению с машинным кодом, но первые компиляторы имели ограниченный набор функций, глючили и генерировали неоптимальный код. Во-вторых, у машин было мало памяти. Машина со 100 000 байтов памяти была большой редкостью, при этом значительная часть этого драгоценного ресурса была отдана операционной системе и программному коду. В-третьих, инструментов отладки не существовало. Если что-то пошло не так или вы подозревали, что что-то не так, арсенал средств поиска проблемы был крайне ограничен. Наконец, компьютеры стоили дорого и доступ к ним был сложен. Большая часть ранних работ в области шахматного программирования сильно страдала из-за сложностей в получении доступа к дорогостоящему компьютерному оборудованию. В этих сложных условиях прогресс в разработке сильных шахматных программ был ожидаемо медленным.

3.5.3

Алекс Бернстайн и первая полноценная шахматная программа

Неудивительно, что большую часть пионерских проектов в области компьютерных шахмат осуществили люди, которые либо были сотрудниками компаний, производящих компьютерное оборудование, либо работали в университетах. И у тех и у других был пусть и ограниченный, но всё-таки какой-никакой доступ к драгоценному компьютерному времени (особенно посреди ночи). IBM была компанией, обладавшей ключевым ресурсом для создания шахматной программы: современными компьютерами. Однако одних только машин было недостаточно: чтобы создавать программы, нужны ещё и программисты, а людей с необходимыми навыками было в то время трудно найти (как, впрочем, нередко бывает и сейчас). На что были похожи практики поиска сотрудников в ИТ в 1950-е?

В декабре 1956 г. IBM разместила объявление в журнале *Scientific American* и в газетах *New York Herald Tribune* и *Los Angeles Times*, в котором сообщала, что ищет тех, кто интересуется программированием компьютеров. В рекламе использовалось изображение чёрного шахматного коня и говорилось, что «эта работа понравится тем, кто любит играть в шахматы или разгадывать головоломки».

В ответ на объявление компания получила ровно семь ответов, и этот результат был сочтён отличным. Пятеро из откликнувшихся были опытными программистами, работавшими у конкурентов, — кадровое браконьерство всегда было в той или иной мере свойственно компьютерной индустрии. Двое других были новичками, и только один из них оказался полезным в долгосрочной перспективе. Первым был шахматист, который *«интересовался только игрой в шахматы»*, и вскоре IBM *«позволила ему вернуться к своей доске»*. Второй *«почти ничего не знал о вычислительной технике»*, но, как утверждалось, его IQ равнялся 172 баллам, и, по словам сотрудника компании, ответственного за наём программистов, кандидат *«обладал тем типом ума, который нам нравился… [Он] научился играть на пианино, когда ему было десять лет, пребывая в уверенности, что нота фа в действительности является нотой ми. Так он и играл в течение многих лет. Бог знает, через что прошли его соседи. Однако, следует отметить, эта история показала наличие прекрасного независимого таланта к систематической работе по преобразованию значений»*. В конце концов первоначальная рекламная кампания и её последующее продолжение в еженедельнике *The New Yorker* привели к появлению многообещающих «джуниоров». В их число входили кристаллограф, получивший образование в Оксфорде, доктор философии в области английского языка из Колумбийского университета, экс-модель из модной индустрии, протохиппи и многочисленные шахматисты.

Одним из откликнувшихся на объявление стал победитель чемпионата США (U. S. Open) по шахматам Артур Бисгайер. Также среди связавшихся с компанией были Алекс Бернстайн, бывший капитан шахматной команды Высшей научной школы Бронкса (The Bronx High School of Science, среднее учебное заведение с высоким уровнем преподавания)[621], Дон Шульц, который позднее стал президентом Шахматной федерации США, а также Сид Нобл,

самопровозглашённый «чемпион по шахматам Французской Ривьеры». Единственное, что объединяло этих начинающих программистов, — это, пожалуй, только их выдающиеся результаты в серии тестов, основанных на интеллектуальных головоломках, да достаточная самоуверенность для того, чтобы откликнуться на расплывчатые, но интригующие объявления IBM[622, 623].

Долгое время о биографии Алекса Бернстайна, несмотря на его весомый вклад в историю развития шахматного программирования, было известно немного. Некоторые подробности удалось установить в результате переписки с его ныне здравствующими родственниками. Отец Бернстайна — математик Владимир Бернштейн, уроженец Санкт-Петербурга, был учеником профессора Якова Успенского. В 1919 г. Владимир решает покинуть разорённую Гражданской войной Советскую Россию. Во время пересечения советско-финской границы в районе Выборга он получил серьёзное пулевое ранение, которое стоило ему потери лёгкого. В эмиграции Владимир Бернштейн сменил несколько стран пребывания. Какое-то время он жил в Лондоне, а в середине 1920-х перебрался во Францию, где поступил в Сорбонну и в 1930-м защитил докторскую диссертацию, посвящённую проблеме единственности для рядов Дирихле. Опубликованная в 1933 г. монография Бернштейна, посвящённая этим рядам, получила очень высокую оценку от знаменитого французского математика Жака Адамара. В 1931 г. Бернштейн получил итальянское гражданство и преподавал аналитическую геометрию в Павии и математический анализ в Милане. Именно в Милане и родился Алекс Бернстайн. К сожалению, здоровье Владимира было серьёзно подорвано из-за ранения, и в 1936 г. он скоропостижно скончался в Милане от пневмонии, не дожив до своего 36-летия. Примерно в 1940 г. юный Алекс с матерью и её вторым мужем перебираются в Нью-Йорк. Здесь он окончил школу, колледж, а затем Колумбийский университет, где изучал математику и средневековую французскую литературу[624, 625]. Во время Корейской войны его призывают в армию. Благодаря познаниям в области математики он попадает в специальное техническое подразделение, где получает первые знания в области компьютерной техники. Сын Алекса, Макс Бернстайн, так описывает историю знакомства своего отца с компьютерами: *«Когда его призвали в армию (это была война в Корее), он упомянул свои познания в области математики, и его пригласила на собеседование женщина, которая создавала специальное техническое подразделение и искала новобранцев, хорошо разбирающихся в математике. Сама она была русской и когда увидела его фамилию, то спросила: „Бернштейн? Вы случайно не в родстве с Владимиром Бернштейном?“ Когда он сказал, что является сыном Владимира, она ответила: „Пойдём, я научу тебя компьютеру“. Таким образом, именно армия дала ему образование в области компьютеров. Я не знаю подробностей его работы в армии, но она была весьма разнообразной, мне смутно помнится, как он рассказывал о попытках оптимизировать оборонительные позиции США на континенте (в случае авианалётов? ракетных атак?) и про использование полиномов Чебышёва для чего-то связанного с кораблями для военно-морского флота»*[626].

3.5.3

Алекс Бернстайн и первая полноценная шахматная программа

Идея создания шахматной программы принадлежала изначально товарищу Алекса Бернстайна Хэлу Джадду и была поддержана Чарльзом ДеКарло — главой отдела прикладной науки компании[627]. Бернстайн в итоге возглавил команду по созданию шахматной программы, в которую помимо него вошли Майкл де Ван Робертс, Тимоти Арбакл и Мартин Бельски. Артур Бисгайер стал шахматным советником проекта. Разработанная программа относилась к типу *B* по терминологии Шеннона, выполняя перебор на четыре полухода в глубину и рассматривая по семь наиболее перспективных альтернатив на каждом уровне дерева перебора.

Эти ограничения были связаны со временем, необходимым для выбора хода: обычно машина затрачивала на принятие решения около восьми минут, а если на каждом уровне дерева перебора анализировалось не семь, а восемь вариантов, то этот интервал возрастал бы до 15 минут. При этом увеличение глубины перебора на один полуход приводило бы к увеличению времени расчёта до шести с половиной часов. Современному компьютеру на те же вычисления потребовались бы доли секунды[628, 629].

Несмотря на то что команда Бернстайна получила уникальные результаты, знаем мы о ней сегодня очень мало. Биографические данные участников команды крайне скудны, неизвестны даже годы жизни авторов первой в мире шахматной программы. О самом Бернстайне известно, что он научился играть в шахматы в девять или десять лет. Он не проиграл ни одной партии своей программе, но, отзываясь о её игре, однажды заметил, что *«один или два раза она сыграла так хорошо, что это вызвало у меня волненье»*[630]. Многие источники по истории программирования сообщают, что Бернстайн был межуниверситетским чемпионом страны, но в шахматных источниках отсутствуют подтверждения этого факта. Хотя Бернстайн начал работу над шахматной программой только в 1956 г., он успел поучаствовать в знаменитой Дартмутской конференции, куда прибыл вместе со своими коллегами по IBM — уже знакомым нам Артуром Сэмюэлом и Эдвардом Муром[631]. *«Алекс Бернстайн, приехавший из Нью-Йорка, чтобы поговорить о шахматной программе, сразился в шахматы с Маккарти, что эквивалентно индивидуальному поединку (тапо-а-тапо) в мире науки. Бернстайн победил, несмотря на то, что предоставил противнику фору, играя вслепую. После этого, по возвращении в Нью-Йорк, он создал программу, чтобы окончательно победить Маккарти. Поскольку его визит в Дартмут не совпал с визитом Ньюэлла и Саймона, Бернстайн лишь позже узнал о том, что они независимо пришли к некоторым идеям в отношении одной и той же задачи»*, — пишет упоминавшаяся нами в первой части писательница и специалистка по истории ИИ Памела Маккордак[632]. Сам Маккарти в своих воспоминаниях немного более скуп: *«Алекс Бернстайн из IBM представил свою шахматную программу на стадии разработки. Моей реакцией было изобрести и порекомендовать ему альфа-бета-отсечение. Его это не убедило»*[633]. Работа Бернстайна так и не получила продолжения, и эстафета перешла к другим командам. Шахматный проект изначально развивался по остаточному принципу, во всяком случае

Рис. 67. Алекс Бернстайн демонстрирует, как компьютер IBM 704 играет в шахматы

в интервью *The New Yorker* Бернстайн сетовал на занятость в других проектах IBM[634]. Изначальным или по крайней мере официальным оправданием менеджеров IBM, позволивших Бернстайну использовать первые IBM 704 для столь несерьёзной вещи, как программирование шахмат, была надежда на то, что в случае успеха это послужит демонстрацией того, что компьютеры могут решать задачи, сопоставимые по сложности с теми, с которыми сталкивается бизнес. Однако акционеры не оценили достижения Бернстайна и Сэмюэла и были не в восторге от того, что ресурсы фирмы тратились на игры[635].

В наследие от Бернстайна нам осталось несколько статей, фотографий и даже короткое видео, демонстрирующее игру Бернстайна со своим детищем.

3.5.4 СССР и США — творческая атмосфера созидания

В 1958 г. уже упоминавшиеся нами Аллен Ньюэлл, Герберт Саймон и Клифф Шоу разработали собственную шахматную программу в Институте технологий Карнеги (Carnegie Institute of Technology, CIT). Обычно её называют NSS — по первым буквам фамилий создателей, либо просто CP (Chess Program, «шахматная программа»), или даже CP-1. Это была первая шахматная программа, написанная на языке высокого уровня. Этим языком был язык IPL (Information Processing Language, «язык обработки информации»), созданный Шоу и ставший одним из предшественников языка Lisp.

Как и программа Бернстайна, NSS относилась к шенноновскому типу *B*, однако число рассматриваемых вариантов на каждом из уровней дерева перебора не было фиксированным. Вместо этого программа содержала несколько генераторов ходов, каждый из которых предлагал список ходов, соответствующих определённой цели. Важным нововведением стало использование одного из ранних вариантов альфа-бета-отсечения. NSS работала на компьютере JOHNNIAC (JOHn von Neumann Numerical Integrator and Automatic Computer, «Численный интегратор и автоматический компьютер Джона фон Неймана») и была способна обыграть в шахматы новичка.

3.5.4

СССР и США — творческая атмосфера созидания

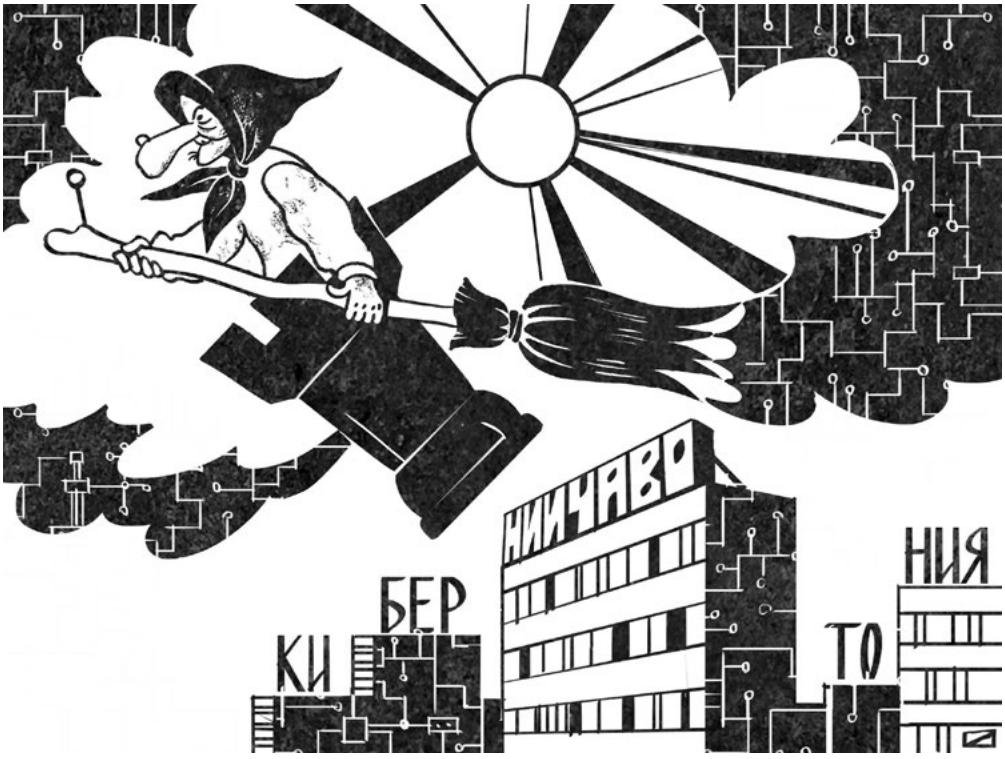
В 1959 г. первокурсники Массачусетского технологического института Алан Коток, Элвин Берлекэмп, Майкл Либерман, Чарльз Ниссен и Роберт Вагнер, будучи студентами Джона Маккарти, начали собственный шахматный проект. В качестве отправной точки они выбрали программу Бернстайна, добавив к ней альфа-бета-отсечение. Программа Котока — Маккарти была написана на фортране, работала на мейнфрейме (мощном сервере) IBM 7090 и была способна анализировать около 1100 позиций в минуту. Программа была готова в 1962 г. и легла в основу дипломной работы Котока.

Примерно в то же время задачей создания полноценной шахматной программы озаботились советские программисты. Как и в США, в конце 1950-х — начале 1960-х гг. такие проекты появлялись в первую очередь в коллективах, связанных с разработкой вычислительных машин, и так же, как и в США, выполнялись энтузиастами в условиях, когда руководство не испытывало большого восторга от подобного нецелевого использования дефицитных вычислительных ресурсов. Однако стоило таким проектам получить хотя бы минимальную поддержку со стороны руководства, хотя бы в форме непротивления, как увлечённые программисты были готовы буквально свернуть горы.

Одним из покровителей шахматного программирования в это время стал Михаил Шура-Бура — один из ведущих проектировщиков машины М-20. С 1953 г. Шура-Бура работал в отделении прикладной математики Математического института АН СССР (МИАН), на основе которого в середине 1950-х гг. был создан Институт прикладной математики АН СССР (сокращённо — ИПМ). Под руководством академика Келдыша Шура-Бура работал во главе отдела программирования ИПМ над задачами расчёта траекторий искусственных спутников Земли. Первые программы для решения этих задач были разработаны для ЭВМ «Стрела», а позже расчёты продолжились на вступившей в строй в 1958 г. машине М-20.

По одной из распространённых легенд, Шура-Бура стал прототипом персонажа романа братьев Стругацких «Понедельник начинается в субботу» по имени Роман Петрович Ойра-Ойра. Существовали и иные предположения. Например, авторы русскоязычной «Википедии» считают (без указания источника), что этим прототипом был другой известный советский учёный — математик Сергей Новиков[636]. Борис Стругацкий, однако, отрицал обе версии, сообщив, что Роман Ойра-Ойра — герой без прототипа[637].

Братьям Стругацким, безусловно, удалось создать на страницах «Понедельника» целый ряд архетипических образов советских учёных. Их произведение передаёт дух, настроения, привычки и проблемы, характерные для научно-технической интеллигенции середины XX в., именно поэтому людей и коллективы, которые теоретически могли бы быть прототипами персонажей «Понедельника», мы можем найти где угодно. Быть может, НИИЧАВО — это лебедевская Феофания? В конце концов, она находилась неподалёку от Лысой Горы, а отчество смотрительницы музея Наины Киевны Горыныч является отсылкой к Киеву, в предместьях которого и располагалась обитель создателей МЭСМ! Высказываются и такие предположения[638, 639].



Смелые эксперименты в области ИИ, которые ставились как в СССР, так и в США в 1950–1970-е гг., проходили в удивительной среде и совершенно особой атмосфере. В США в области компьютерных разработок сформировалась субкультура хакеров*, в Советском Союзе её приблизительным аналогом можно считать субкультуру кибертонцев.

В 1957 г. на базе лаборатории вычислительной математики и техники Института математики АН УССР — той самой лаборатории Лебедева — был создан Вычислительный центр АН УССР, преобразованный в 1962 г. в Институт кибернетики АН УССР. Его директором стал советский математик и кибернетик Виктор Глушков, будущий академик АН СССР. В то время средний возраст сотрудников Института кибернетики составлял примерно 25 лет, Глушков был самым старшим — ему было «целых» 39 лет[640]. Одним из многочисленных шуточных изобретений молодых сотрудников института стала виртуальная страна Кибертония, «обнаруженная» «нашими фантастами и художниками» в ходе подготовки к новогоднему вечеру в декабре 1962-го.

Первое заседание-презентация страны прошло в помещении Киевского театра юного зрителя, которое арендовали для проведения новогоднего вечера. Веселье начиналось уже на входе: чтобы попасть в Кибертонию,

* Сегодня слово «хакер» обычно используется для обозначения компьютерных взломщиков, но изначально оно имело иной смысл; хакер — это тот, кто «врубается», компьютерный энтузиаст и эксперт.

требовалось пройти через лаз в деревянном заборе. В Кибертонии имела хождение собственная валюта — кибертина (или просто «киба») из «Киберbанка». Поначалу каждую купюру вырезали из картона, присваивая ей уникальный номер и заверяя печатью комсомола. Позже кибертины стали изготавливать из перфокарт. Кибертинами гости оплачивали различные аттракционы: «Киберзагс», «Кибермаг», «Кибермахерская», «Киберробот», «Бар Дель Рио» (конечно, это название обыгрывалось как «бордель „Рио“»), «Предсказатель судьбы — Зодиак-13».

Весьма популярным был аукцион, на котором разыгрывались всевозможные предметы, начиная от булыжника в обёрточной бумаге и заканчивая абстрактными картинами художника-любителя Георгия Донца из «Киберландской академии антихудожеств». Проходили конкурсы «Выборы дона Кибертона и синьорины Кибертины», «Мисс Кибертонии», в ходе которых претендентам, дабы заслужить симпатии жюри и зала, нужно было отвечать на различные каверзные вопросы.

Слава о Кибертонии распространилась по всему околокавээновскому молодёжному Киеву. Компания кибертонцев привлекала элитарностью и близостью к технологиям будущего — искусственному интеллекту и роботам. В декабре 1963 г. кибертонцы выступали уже в Октябрьском дворце — самом большом культурном центре Киева[641]. Кибернетики выпускали собственные газеты — «Импульс», «Вечерний Кибер», а любительская киностудия института снимала фильмы[642]. В одном из них иностранный шпион тайком проникает в Советский Союз, чтобы добыть секреты Института кибернетики. Поскольку

Рис. 68. Объявление о представлении страны Кибертонии на новогоднем вечере в декабре 1962 г.

Рис. 69. Номер газеты «Вечерний Кибер»

здание института в те годы ещё не было достроено, коллектив временно размещался в небольшом доме на улице Лысогорской. Из-за нехватки места машинисток посадили в помещении, в котором до недавнего времени находился туалет. Киношный шпион проникает в институт и обнаруживает, что девушки работают за печатными машинками, устроившись на унитазах. Потрясённый этим открытием, иностранный агент немедленно пошёл сдаваться майору Пронину[643].

Посетителям новогодних вечеров «Советом Роботов Кибертонии» выдавался паспорт Кибертонии (а парам — брачное свидетельство), в котором были приведены пять статей Конституции Кибертонии, принятой 28 декабря 1963 г.

Кибертония не исчерпывалась новогодними праздничными вечерами и репетициями. В течение года в Кибертонии проходили шуточные научные семинары. Их участники под псевдонимами выступали со смешными докладами и печатали сборники тезисов. К примеру, симпозиум «Смеховедческие проблемы кибернетики», который прошёл в апреле 1969 г., включал такие темы докладов: «К вопросу об экономической эффективности смеха», «Проблема в системе „человек — машина“», «К теории простецких автоматов». Помимо шуточных симпозиумов, Советом молодых исследователей Института кибернетики проводились и серьёзные молодёжные конференции, а также научно-популярные мероприятия, посвящённые кибернетике и ЭВМ[644].

ПАСПОРТ

Действителен

по бессрочный

1. Фамилия: $(1+ax)^{2\ln x}$

2. Имя: x^2

3. Отчество: Sin x

4. Место и время рождения: Октябрьский дворец 12.I.1965, 18[00]

5. Национальность: Кибертонец

Выдан: Советом Роботов Кибертонии

XVIII-ИК № 02-87

КОНСТИТУЦИЯ СТРАНЫ КИБЕРТОНИЯ

§ 1

Гражданином Кибертонии считается всякий, владеющий одним из следующих видов смеха:

а) ГОМЕРИЧЕСКИМ;
б) САРКАСТИЧЕСКИМ,
в) ИСТЕРИЧЕСКИМ,
г) БЕЗЗАБОТНЫМ

§ 2

Все граждане Кибертонии имеют равное право на веселье.

§ 3

Хорошее настроение является почетной обязанностью каждого гражданина.

§ 4

Высшим законодательным и исполнительным органом Кибертонии является Совет Роботов.

§ 5

Всякий, кто ослушается Робота, лишается гражданских прав и покидает пределы страны в течение 24 секунд.

Рис. 70. Паспорт Кибертонии

В общем, при Глушкове околокомпьютерная культура, ростки которой дали первые всходы в украинской лаборатории Лебедева, создавшей МЭСМ, расцвела буйным цветом. А в это время в Москве под руководством самого Лебедева, ставшего теперь директором ИТМиВТ, велась разработка новых вычислительных машин. Одной из машин стала М-20, главным конструктором которой был сам Лебедев, а его заместителями два Михаила — Сулим и Шура-Бура.

Под руководством последнего двое молодых учёных — Марат Евграфов и Игорь Задыхайло — вели работу над созданием одной из первых советских шахматных программ. В обсуждении алгоритмов, положенных в основу программы, также принимал участие Вольдемар Смилга — впоследствии известный физик и популяризатор науки, автор ряда научно-популярных статей о шахматном программировании[645, 646]. В своей статье в журнале «Проблемы кибернетики» № 15 за 1965-й Евграфов и Задыхайло не только описывают некоторые алгоритмы, лежащие в основе их программы, но и приводят фрагменты машинного кода программы для М-20[647]. За их успехами с интересом следят не только программисты, но и шахматное сообщество.

В 1961 г. в «Бюллетене Центрального шахматного клуба СССР», посвящённом матчу-реваншу за первенство мира между Михаилом Талем и Михаилом Ботвинником, вышла статья под названием «„Лучший ход“ — за 58 секунд», в которой рассказывалось о программе, созданной советскими программистами, и были приведены две партии, сыгранные программой против людей — «Новичка» (анонимной сотрудницы института, только что научившейся играть в шахматы) и «Любителя». В первой партии программа одержала победу, во второй — потерпела поражение. Из статьи мы узнаём, что программа пока что не обучена делать рокировку, а также о принципах оценки позиции, которые включают в себя оценку материала (девять с половиной пешек за ферзя, пять — за ладью и три с половиной — за лёгкую фигуру), мобильности, атаки на фигуры и пешки, а также их защищённость, степень продвинутости пешек, положение в центре, связки и пешечное прикрытие короля[648].

Первые матчи шахматных программ и история «Каиссы» 3.5.5

И всё-таки самым известным советским проектом в области компьютерных шахмат стала программа, созданная другим творческим коллективом. В начале 1960-х гг. одна из машин М-20 оказалась в распоряжении Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ). Математическим отделом института руководил в то время Александр Кронрод — ученик знаменитого академика Лузина. Участник боёв под Москвой в 1941 г., Кронрод получил на фронте два ранения и за проявленную храбрость был награждён орденом Красной Звезды. Вернувшись с фронта, Александр Семёнович продолжил своё обучение на механико-математическом факультете МГУ, где под руководством Лузина создал теорию функций двух переменных. Эта работа легла в основу его кандидатской диссертации, блестяще защищённой в 1949 г. По итогам защиты Кронроду присуждена степень доктора физико-математических наук, минуя степень кандидата. Официальными оппонентами Кронрода на защите были академики Мстислав Келдыш и Андрей Колмогоров, а также профессор Дмитрий Меньшов.

Отдел Кронрода в ИТЭФ был занят численным решением физических задач, связанных с созданием атомного оружия. Атомная тематика в некотором смысле роднила советских и американских кибернетиков, хотя их работа и заключалась в создании оружия, способного принести друг другу неумолимую ядерную смерть. К счастью, выяснение отношений произошло в итоге за шахматной доской.

Карьера Кронрода в области вычислительной математики началась в 1945 г., когда он, будучи студентом четвёртого курса, устроился на работу в вычислительный отдел Лаборатории № 2 АН СССР (сейчас — Национальный

исследовательский центр «Курчатовский институт»). Кронрод был женат, в 1943 г. у него родился сын, и молодая семья нуждалась в жилье и дополнительных источниках дохода. По воспоминаниям коллег, Кронрод ничего не делал спустя рукава, поэтому занялся вычислительной математикой всерьёз и вскоре обнаружил, что это весьма интересная область, во многом отличная от чистой математики.

Арсенал вычислительной техники, доступный советским учёным во второй половине 1940-х гг., включал в себя электрические арифмометры, табуляторы и механизмы для сортировки перфокарт. Вскоре Кронрод познакомился с талантливым инженером Николаем Бессоновым, который из нескольких табуляторов и сконструированного им релейного умножающего устройства создал своеобразный «комбайн», способный решать более сложные вычислительные задачи. Успех этого проекта натолкнул Бессонова и Кронрода на мысль о создании универсальной цифровой вычислительной машины с программным управлением. Проект такой релейной вычислительной машины (РВМ-1) был принят к производству. В конструкцию машины были заложены оригинальные и весьма передовые идеи, например каскадный метод для осуществления параллельных расчётов. При этом важно учитывать, что Бессонов и Кронрод ничего не знали ни о работах Эйкена, ни о работах Цузе: первые западные публикации о вычислительных машинах стали известны в СССР только в конце 1940-х гг. Если бы РВМ-1 была построена в сжатые сроки, то, вероятно, могла бы соревноваться в скорости вычислений с первыми электронными машинами или даже превзойти их.

В 1949 г. Курчатов и Ландау порекомендовали Кронрода Алиханову, руководившему в тот момент созданием нового атомного института (позже получившего название ИТЭФ). Получив от последнего предложение возглавить математический отдел, Кронрод принял его и, перейдя во вновь сформированное учреждение, привёл с собой и Бессонова. Здесь они начали работы по постройке РВМ, которые, однако, продвигались мучительно медленно.

Существует мнение, что одной из главных причин медленного прогресса было недостаточно серьёзное отношение к проекту, вызванное его сравнительной дешевизной. Более умудрённые в управленческой магии коллеги советовали Кронроду ускорить производство, выполнив, например, контакты из золота: это не сильно улучшило бы качество машины, но сделало бы её дороже, что в итоге могло изменить отношение к ней. Однако Кронрод со смехом отвергал подобные советы. В результате, когда РВМ была построена, на сцену уже вышли электронные машины, и хотя РВМ и была способна состязаться с первыми из них, но у неё, конечно, уже не было будущего.

Кронрод был не из тех людей, которые рефлекторно цепляются за отжившие, пусть и дорогие лично им, идеи. Он быстро оценил преимущество электронных элементов перед релейными и активно включился в обсуждение конструкций первых ЭВМ. И всё же РВМ глубоко в душе осталась любимым его детищем — когда её демонтировали, на глазах Кронрода были слёзы[649]. Впрочем, век РВМ был не таким уж коротким — полностью завершённая

3.5.5

Первые матчи шахматных программ и история «Каиссы»

в 1957 г. машина оставалась в строю до 1965-го. Благодаря исключительной надёжности машина оказалась весьма полезной для решения экономических задач, требовавших обработки больших массивов информации. В частности, именно на РВМ-1 выполнялись в 1961–1962 гг. расчёты цен по новой системе ценообразования[650].

За работы по численному решению физических задач, выполненные в 1950–1955 гг., Кронрод был удостоен Сталинской премии и награждён орденом Трудового Красного Знамени.

В 1955 г. отдел Кронрода получил в своё распоряжение первую ЭВМ, которой стала машина М-2, сконструированная коллективом под руководством Исаака Брука. Первые опыты с М-2 привели Кронрода к мысли, что вычислительные задачи — это не главное, для чего может быть употреблена ЭВМ. Главное — научить машину думать, решать творческие задачи. С этого момента одним из главных увлечений Кронрода становится область, получившая название «эвристического программирования». Вокруг Кронрода быстро формируется кружок учеников и единомышленников из числа математиков и физиков. В комнате, соседней с той, в которой стояла машина М-2, начал работать «кружок Кронрода». Здесь обсуждались методы распознавания образов, транспортная задача, задачи теории автоматов и многие другие. Кронрод предложил выбрать эталонную задачу, продвижение в решении которой позволяло бы сделать выводы о прогрессе, достигнутом в области эвристического программирования. Первой такой задачей стала карточная игра в подкидного дурака. Несмотря на кажущуюся несерьёзность, это — сложная игра, не имевшая разработанной теории и в то же время допускающая простое описание позиции, что было крайне важным в условиях дефицита памяти и вычислительной мощности машины. В процессе создания программы авторы выработали ряд общих принципов создания игровых систем ИИ.

И всё же программа для игры в подкидного дурака была слишком локальным явлением. Кронрод предложил использовать другую игру — шахматы, которые пользовались всемирной популярностью[651]. Но для реализации такого амбициозного для того времени проекта мощностей М-2 было явно недостаточно. Поэтому проект стартовал только вслед за появлением в ИТЭФ новой машины — М-20. Созданием шахматной программы занялись Владимир Арлазаров, Георгий Адельсон-Вельский, Александр Животовский и Анатолий Усков.

В 1965 г. в порядке международного обмена группа западных учёных посетила СССР. В составе весьма представительной делегации был и автор термина «искусственный интеллект» Джон Маккарти. Визит начался с участия в III Всесоюзном совещании по автоматическому управлению (технической кибернетике), которое было открыто 20 сентября в Одессе и продолжилось на борту парохода «Адмирал Нахимов»[652]. Затем был организован тур по советским научно-исследовательским институтам. Делегация посетила Киев, где состоялась встреча с академиком Глушковым и профессором Ивахненко,

а также с директором Киевского института автоматики Борисом Тимофеевым. Также состоялись поездки в Тбилиси, где западных гостей встречал директор Института систем управления Академии наук Грузинской ССР Арчил Элиашвили. Грузинские учёные продемонстрировали зарубежным коллегам экспериментальную систему, способную распознавать произносимые вслух цифры, а также робота с голосовым управлением. Затем последовали визиты в Баку, Минск, Ленинград и Москву[653].

В Москве Джона Маккарти встретил его старый знакомый — академик Андрей Ершов. Ершов и Маккарти познакомились в декабре 1958 г. в Теддингтоне (Великобритания) на конференции по автоматизации мыслительных процессов. Вместе с Ершовым Маккарти отправился в Новосибирск, в Академгородок (Ершову стоило больших трудов согласовать этот визит), откуда через Москву вернулся домой[654]. О тёплых отношениях, сложившихся в ходе этой поездки между Ершовым и Маккарти, свидетельствует их переписка. Например, Маккарти пересылает Ершову слова одной из песен Боба Дилана, а сам просит Ершова прислать ему запись песни «Шла машина из Тамбова»[655]. Спустя три года Маккарти повторно посетит Академгородок, где проведёт два месяца в качестве сотрудника Вычислительного центра, прочитав курс по верификации программ в Новосибирском государственном университете[656].

За время поездки Маккарти познакомился с Кронродом и узнал о советских усилиях в области шахматного программирования, тогда же и родилась идея об организации первого международного матча: программа ИТЭФ против детища Маккарти.

Позже Маккарти вспоминал крылатую фразу Кронрода: «Шахматы — это дрозофила искусственного интеллекта». Рассуждая об этой фразе, он заметил, что, с одной стороны, шахматы совершенно очевидно не являются «дрозофилой» для всех областей ИИ, но, с другой стороны, и дрозофила не является «дрозофилой» для всех исследований в области генетики[657].

Матч между советской и американской шахматными программами начался в ноябре 1966-го и продлился около года: четыре партии игрались одновременно, а ходы программ передавались по телеграфу. Программа ИТЭФ одержала победу в матче со счётом 3 : 1 (две победы и две ничьих).

По оценкам гроссмейстеров Бронштейна и Таля, программа ИТЭФ играла в силу третьего шахматного разряда[658].

До наших дней сохранился интереснейший документ — исходный код шахматной программы ИТЭФ для машины М-20[659]: 121 страница бланков, заполненных машинными кодами, снабжёнными загадочными комментариями типа «Таня не журись», «шлёп», «дребедень», «пуп» и даже «ухуду пешки», в полной мере даёт представление о секретных техниках советских программистов 1960-х. На самом деле за этими словами нередко скрывались аббревиатуры названий соответствующих подпрограмм. Например, УХУДУ — подпрограмма **у**порядочения **х**одов, **у**довлетворяющих **д**анному **у**словию, ПУП — подпрограмма **п**ере**уп**орядочения ходов[660, 661].

Команда Кронрода придерживалась подхода, который получил название «программирование в содержательных обозначениях». Этот метод, предложенный в 1953 г. Александром Брудно, предполагал использование для написания программ специальных бланков, в правой части которых записывались машинные коды, а в левой — соответствующие им команды в содержательной, удобной для чтения человеком форме[662]. Естественными противниками этого подхода были сторонники языков высокого уровня, таких как алгол, к числу которых относились уже знакомые нам академик Ершов, Владимир Курочкин (между прочим, автор знаменитой реализации Алгол-60 для машин БЭСМ, получившей прозвище «Алгол Курочкина»), а также Константин Семендяев, соавтор «Справочника по математике для инженеров и учащихся втузов», в народе называвшегося не иначе как «Бронштейн — Семендяев».

В 1960-е между сторонниками обоих лагерей разразилось эпическое сражение, выплеснувшееся на страницы периодических изданий в виде ряда писем, рецензий и статей[663]. Сторонники «программирования в содержательных обозначениях» настаивали на неэффективности кода, производимого компиляторами алгола, неудобстве отладки (важно понимать, что в 1960-е отладка программ, написанных на алголе, всё равно происходила в машинных кодах) и на том, что экономия, достигаемая за счёт автоматизации перевода программы из человеко-читаемой формы в машинный код, является эфемерной. Гораздо проще нанять кодировщиц, месячная заработная плата

которых сопоставима с себестоимостью часа работы машины, которые будут переводить в машинный код «содержательные обозначения»[664]. В конечном счёте победа досталась сторонникам языков высокого уровня, хотя программирование в машинных кодах иногда применяется и в наши дни там, где важно добиться максимальной производительности программ. В частности, современные шахматные программы нередко содержат вставки на языке ассемблера * или напрямую в машинных кодах.

К сожалению, в развитие шахматного проекта ИТЭФ вмешалась политика, и в этот раз, увы, вовсе не в позитивном ключе. В 1968 г. Кронрод стал одним из подписантов «Письма девяноста девяти» — коллективного открытого письма советских математиков в защиту своего коллеги Александра Есенина-Вольпина, принудительно помещённого в психиатрическую больницу в связи с его диссидентской деятельностью. Вероятно, это и стало причиной увольнения Кронрода и ряда его коллег из ИТЭФ. Адельсон-Вельский, Арлазаров и Усков перешли в Институт проблем управления АН СССР, где спустя некоторое время стартовала работа над новой шахматной программой, основанной на исходных текстах программы ИТЭФ. В её разработке участвовали Михаил Донской, Александр Битман, Андрей Леман, А. М. Бараев и Марианна Розенфельд. Последняя и предложила рабочее название программы: КВО, то есть программа, **к**оторая **в**сех **о**быгрывает[665].

Аппаратной платформой для новой программы стал один из британских мейнфреймов ICL 4/70, закупленных СССР в начале 1970-х. Эта машина была совместима с IBM 360, при этом на неё не распространялись экспортные торговые ограничения времён холодной войны[666]. В те годы активно обсуждалась возможность широкой программы кооперации с компанией ICL, которая предлагала передачу СССР технической документации на машины, совместную работу над программным обеспечением, а также общий проект по созданию ЭВМ четвёртого поколения[667].

В 1972 г. программа, разработанная сотрудниками Института проблем управления, играла уже весьма неплохо, и газета «Комсомольская правда» предложила организовать на своих страницах товарищеский матч машины против читателей. Именно в ходе подготовки к этому матчу шахматный обозреватель «Комсомолки» Виктор Хенкин предложил дать программе имя «Каисса» в честь богини-покровительницы шахмат[668].

Забавно, что в некоторых источниках Каиссу называют «древнегреческой богиней шахмат» или «древнегреческой музой шахмат». Разумеется, это нонсенс. Прототип современных шахмат — индийская игра чатуранга (санскр.

* Язык ассемблера (assembly language) — язык программирования низкого уровня. Он представляет собой систему обозначений, используемую для представления в удобочитаемой форме программ, записанных в машинном коде. Команды языка соответствуют отдельным командам, выполняемым процессором машины, или их коротким последовательностям. Поскольку наборы команд различаются в зависимости от используемой аппаратной платформы, в действительности мы имеем дело не с единым языком, а с классом аппаратно-специфичных языков, хотя и разделяющих обычно некоторые условные обозначения. Например, команда ADD, используемая для сложения чисел, почти во всех этих языках называется именно так.

3.5.5

Первые матчи шахматных программ и история «Каиссы»

चतुरङ्ग; *caturaṅga*, от названия боевого построения, упоминающегося в Махабхарате), она возникла в Индии во времена правления династии Гуптов примерно в V в., то есть спустя шесть веков после завершения древнегреческого периода. На территории Греции эта игра под названием «затрикион» (ζατρίκιον) появляется в византийский период, ещё несколькими веками позже[669]. Каисса — героиня одноимённой поэмы английского писателя-востоковеда Уильяма Джонса, написанной в 1763 г. и опубликованной в 1772 г. Сюжет поэмы незатейлив: Марс, пленённый красотой дриады Каиссы, смог добиться её взаимности лишь благодаря изобретению шахмат[670]. Вполне вероятно, что имя Каисса восходит к имени нимфы Скаккии (Scacchia) — героини опубликованной в 1527 г. поэмы Марко Джироламо Виды «Игра в шахматы» (Scacchia, Ludus) (шахматы в средневековой латыни обозначались словом *scacci*)[671]. Так что, вероятно, «Каисса» — это всё та же многострадальная «чатуранга», совершившая полное приключений лингвистическое путешествие.

Но вернёмся к матчу на страницах «Комсомольской правды». Его регламент был прост: матч состоял из двух партий, игравшихся с переменой цвета. На совершение хода уходила одна неделя. Ходы читателей выбирались путём голосования. В субботу в газете публиковалась очередная позиция, до вторника редакция получала письма, в четверг ночью «Каисса» «обдумывала» свой ответ. Матч продлился почти год — с января по ноябрь 1972 г. — и завершился победой людей со счётом 1,5 : 0,5[672].

Быстрое развитие вычислительной техники в 1970-е гг. на фоне высокого интереса к шахматам привело к стремительному расцвету шахматного программирования. С 1970 г. стартовал ежегодный Северо-Американский чемпионат по шахматам среди компьютерных программ. В первом чемпионате приняли участие шесть программ, а в 1973 г. — уже 12. Четыре первых года чемпионом становится программа под незамысловатым названием Chess, созданная студентами Ларри Аткином и Дэвидом Слейтом из Северо-Западного университета (Northwestern University, штат Иллинойс, США). Разработка программы была начата в 1968 г. Первоначально в число разработчиков входил также Кейт Горлен, но в 1970 г. он покинул команду. Первые версии программы (включая 3.6 от 1972 г.) относились к шенноновскому типу *B*, как и программа Маккарти. Обаяние идей Шеннона, который рассматривал тип *B* в качестве более совершенного подхода, похоже, владело умами американских разработчиков, в то время как ранние советские программы относились к более прагматичному на тот момент типу *A*.

Впрочем, весной 1973 г. Аткин и Слейт решаются на смену парадигмы. *«Версия 3.6 стала окончательным результатом серии эволюционных изменений оригинальной программы и содержала в себе большую часть недостатков её первоначального дизайна. Chess 3.6 была, как динозавр, представителем вымирающего вида,* — писали авторы. — *Являясь по своей сути программой Шеннона типа B, она была основана на переборе „в глубину“ с альфа-бета-отсечениями и рассматривала более-менее фиксированные по длине варианты. Примитивная функция оценки позиции использовалась для оценки*

терминальных узлов дерева и для выбора n лучших ходов для дальнейшего изучения. Элементарных оценки и перебора Chess 3.6 было достаточно для того, чтобы в большинстве случаев совершать ходы, выглядящие разумно, и не подставлять фигуры под одно-двухходовые угрозы. По всей видимости, этого хватало для того, чтобы играть в силу слабого третьего разряда [class C player] и какое-то время обыгрывать другие программы». Chess 4.0 и его наследники получили более простую модульную архитектуру и относились к шенноновскому типу *A*[673].

Матч 1967 г. и последующие публичные выступления советской шахматной программы подогревали желание организовать международные соревнования, и в августе 1974 г. Международная федерация по обработке информации (International Federation for Information Processing, IFIP) организовала первый чемпионат мира по шахматам среди компьютерных программ. Он состоялся в стокгольмском отеле «Биргер Ярл». Директором турнира был Дэвид Леви.

Из шестнадцати «приглашённых» программ за звание чемпиона мира в итоге сразилось тринадцать — четыре из США (Chess 4.0, CHAOS, Tech 2 и Ostrich), три из Великобритании (Master, Beal, A16chs) и по одной из СССР («Каисса»), Канады (Ribbit), Австрии (Frantz), Швейцарии (Tell), Норвегии (Freedom) и Венгрии (Papa).

Транспортировка мейнфреймов для участия в соревнованиях в 1974 г. представлялась не слишком реалистичной задачей — не только из-за высокой стоимости и сложности перевозки, но и из-за политических и бюрократических проблем. Использовать имевшуюся в Стокгольме машину ICL авторы «Каиссы» не могли из-за особенностей отечественной операционной системы, поэтому советская программа, как и многие другие, участвовала в соревновании по телефону. Работу операторов программ в машинных залах контролировали представители IFIP, они должны были следить за тем, чтобы никто не вмешивался в ход партий. В турнирном зале за шахматными досками с телефонными трубками в руках сидели авторы программ — регламент чемпионата требовал присутствия в зале одного из авторов программы. Оператором «Каиссы» в Стокгольме был Михаил Донской, а в Москве — Владимир Арлазаров. Ходы программ по громкой связи транслировались в конференц-зал ИПУ, где собирались болельщики.

Позже Донской вспоминал, что был единственным участником, претендовавшим на второе место в чемпионате (именно его он обещал тем, кто отправил его на соревнования), в то время как остальные претендовали только на первое. В результате всё обернулось ровным счётом наоборот: именно «Каисса» заняла первое место, выиграв все четыре турнирные партии (турнир проходил по швейцарской системе) и опередив на одно очко программы Chess 4.0, CHAOS и Ribbit. Поскольку «Каисса» и Chess 4.0 не пересеклись в ходе турнира, было решено организовать между ними отдельную игру, которая завершилась вничью. Донскому была вручена для «Каиссы» золотая медаль чемпиона мира среди шахматных программ, сданная потом на

3.5.5

Первые матчи шахматных программ и история «Каиссы»

хранение в ИПУ. В годы перестройки её след затерялся в музеях шахматных клубов[674] (дорогой читатель или читательница, если вы случайно найдёте её, обязательно дайте нам об этом знать).

С чисто шахматной точки зрения первый чемпионат мира представлял не слишком впечатляющее зрелище — партии были полны ошибок, заметных даже шахматным любителям. В последнем туре «Каисса» встретилась с программой Ostrich. В ходе партии американская программа дважды упустила возможность выигрыша (в одном из вариантов она могла дать мат в шесть ходов) и в итоге потерпела поражение. В демонстрационной игре против Chess 4.0 «Каиссе» вновь повезло — противник также упустил победу[675].

Всё это было вполне ожидаемо: «Каисса» в ту пору играла, по оценке Донского, в силу слабого первого разряда *. Однако с научной точки зрения прогресс был огромным. Написанная на смеси фортрана и ассемблера «Каиссы» была способна на своей машине просматривать лишь около 200 позиций в секунду (в миллион раз меньше, чем Deep Blue, созданный спустя 20 лет). Однако уже тогда её авторы смогли реализовать в ней алгоритмы, ставшие затем фундаментом шахматного программирования на многие десятилетия. «Каисса» была способна обдумывать ходы во время хода противника, рационально распределять время на обдумывание, использовала представление позиции на доске в виде набора 64-битных масок **, использовала динамические эвристики для упорядочения ходов в дереве перебора (так называемая «служба лучших ходов» — прообраз современных методов сортировки вариантов), была оснащена дебютной библиотекой, в которой содержалось в общей сложности около 10 000 ходов для различных дебютных позиций, и использовала революционную технику сокращения числа перебираемых вариантов, получившую название «эвристика пустого хода»[676].

Суть этого метода заключается в следующем: если в некоторой позиции внутри дерева перебора передать очередь хода сопернику и проанализировать его ответы при помощи перебора с урезанной глубиной, то, если в результате обнаружится, что противник, несмотря на возможность выполнить ход дважды, всё-таки не смог найти ход-опровержение с достаточной оценкой, перебор в данной позиции можно завершить, вернув оценку, равную верхней границе. Конечно, в шахматах бывают ситуации, когда любой из возможных ходов хуже, чем отсутствие хода. Подобное положение называется цугцванг (от нем. *Zugzwang* — принуждение к ходу). Однако возникают они достаточно редко, и их возможное появление можно в ряде случаев предсказать при помощи дополнительных правил (например, не применять

* Первый разряд соответствует силе игры в 1800–2000 пунктов Эло, рейтинг Эло — метод расчёта относительной силы игроков в играх с двумя игроками; эту систему рейтингов разработал американский профессор физики венгерского происхождения Арпад Эло; новичкам соответствует рейтинг Эло 1000–1200, разница в 100 пунктов между двумя игроками означает, что сильнейший игрок набирает в среднем 64% очков, разница в 200 пунктов — 76% очков.

** Архитектура машины позволяла выполнять быстрые операции с 64-разрядными целыми числами, в которых каждый разряд соответствует одному из полей шахматной доски; сегодня эти технологии называются bitboards — дословно «битовые доски»; впервые этот подход предложил ещё Шура-Бура.

эвристику пустого хода в пешечных эндшпилях с блокированными пешками) или с использованием ещё одного «проверочного» шага перебора с ещё более урезанной глубиной рассмотрения вариантов.

Впрочем, сохранить лидерство в области компьютерных шахмат, как и в космической гонке, Советскому Союзу не удалось. В 1977 г. в Торонто Chess 4.6 берёт реванш и становится чемпионом мира. «Каисса» делит второе место с другой американской программой, уже знакомой нам Duchess из Университета Дьюка. В первом туре чемпионата в партии Duchess против «Каиссы» разыгралась настоящая драма: «Каисса» на ровном месте отдала ладью и проиграла, что многие зрители в зале посчитали проявлением ошибки в программе. Однако, когда после партии «Каиссе» предъявили позицию после ожидаемого от неё «правильного» хода, она продемонстрировала головокружительную комбинацию противника с жертвой ферзя, ведущую к неминуемому мату[677]. Ценой этого красивого поражения стала утрата чемпионского титула.

Третье и последнее выступление «Каиссы» на чемпионате мира состоялось в 1980 г., где она поделила 6–11-е места. Примечательно, что первое место в чемпионате досталось не Chess 4.9, которая была, наряду с «Каиссой», одной из двух главных претенденток на победу, а программе Кена Томпсона — Belle. Из 18 участников III чемпионата восемь были из США, трое из Великобритании и трое из Канады. Социалистический лагерь был представлен одной лишь «Каиссой»[678, 679].

В 1990 г. команда из девяти программистов, возглавляемая Донским, выпустила новую версию «Каиссы», написанную на языке Си для операционной системы MS-DOS. Обновлённая программа участвовала во Второй компьютерной олимпиаде, разделив 4–6-е места (из 11 участников)[680, 681].

Сегодня сложно дать однозначный ответ на вопрос о том, почему «Каисса» не смогла сохранить лидерство. Сами авторы считали, что дело было в отставании аппаратной базы: машина, которую использовала «Каисса», была медленнее, чем у конкурентов[682]. Кроме того, команда «Каиссы» щедро делилась алгоритмическими находками с сообществом шахматных программистов — принципы работы программы были детально описаны в ряде статей[683, 684, 685, 686, 687], а затем и в книге[688], посвящённой методам шахматного программирования. Нельзя исключать и влияние субъективных факторов: интересы разработчиков со временем меняются, на смену творческим подъёмам приходят творческие кризисы, разработчики могут свернуть на неправильный путь, теряя время на попытки развития непродуктивных идей, в конце концов, люди стареют и утрачивают энергию и задор, поэтому смену лидеров в том или ином направлении можно считать во многом естественным процессом.

Рискну предположить, что результат первых чемпионатов был во многом случайным. Каждая из программ-участниц сыграла в каждом из турниров всего по четыре партии. При приблизительно равной силе игры лучших программ распределение мест между ними могло быть практически каким

угодно. К сожалению, организовать эксперимент из многих тысяч или хотя бы сотен игр для установления исторической истины сегодня вряд ли представляется возможным. Одно можно сказать с уверенностью: алгоритмы, изобретённые авторами «Каиссы», были действительно революционными для своего времени и её создатели внесли огромный вклад в развитие компьютерных шахмат.

3.5.6 Рассуждения о теоретической основе шахматного программирования и идеи Ботвинника

С 1970-х гг. создатели шахматных программ постепенно отходят от парадигмы, предложенной Шенноном. Можно ли сказать, что «Каисса» была программой шенноновского типа *A*, как её предшественница из ИТЭФ, или же она относилась к типу *B*? Ответ на этот вопрос не так прост.

С одной стороны, благодаря эвристике пустого хода или «модели активной игры», при использовании которой в некоторых узлах дерева перебора анализировались только «активные» ходы, программа исключала часть ветвей дерева из рассмотрения. В принципе, исключение ветвей происходит и при альфа-бета-отсечении, но оно, в отличие от упомянутых ранее эвристик, является «безопасным», то есть не может изменить оценку программой позиции по сравнению с полным перебором вариантов. Казалось бы, в силу селективности перебора «Каиссы» её следовало бы отнести к типу *B*, однако использование метода «итеративного углубления» приводит к тому, что ходы, отброшенные при анализе позиции на n-й итерации, могут быть изучены на $(n+1)$-й. В зависимости от особенностей реализации эвристика пустого хода может исключить некоторые ходы из перебора «безвозвратно», но это происходит не всегда. Словом, программы второго поколения, такие как «Каисса», активно использовали подход, при котором более перспективные варианты рассматривались более глубоко. Целый сонм правил управлял в таких программах принятием решений о сокращении или же, наоборот, продлении перебора для тех или иных ходов. Например, шахи, ходы пешек на предпоследнюю горизонталь, размены, взятия, приводившие к переходу в пешечный эндшпиль, иногда даже просто взятия могли увеличивать глубину перебора на один полуход или даже на нецелое количество полуходов, скажем на ½ полухода (к примеру, два взятия приводят к продлению перебора на один полуход). С другой стороны, для бесперспективных ходов глубина рассмотрения уменьшалась — под «сокращение» могли попадать «тихие» ходы в позициях с нехваткой материала (обычно трудно отыграть материал, совершая пассивные ходы — не совершая взятий, шахов или ходов проходных пешек), просто предположительно слабые ходы (например,

помещённые в конец списка ходов эвристиками, отвечающими за упорядочивание ходов на основе статистических данных о том, как часто те или иные ходы становились лучшими в процессе перебора) и так далее. Второе поколение шахматных программ стало золотым веком изобретателей эвристических правил. Их создание часто ограничивалось только полётом фантазии: творческое озарение, поспешная реализация, несколько десятков (в лучшем случае) тестовых партий — и вот уже программа оснащена новым, доселе невиданным знанием. Этот подход не был уникальной чертой шахматного программирования — он был распространён в самых разных областях ИИ вплоть до конца 1980-х или даже до 1990-х. Сегодня мы часто называем этот период временем GOFAI — Good Old-Fashioned Artificial Intelligence (Старого доброго искусственного интеллекта). Этот термин был предложен профессором Джоном Хогландом в книге «Символьные вычисления. Искусственный интеллект: сама идея» (Symbolic Computation. Artificial Intelligence: The Very Idea, 1985) для обозначения символьного подхода в ИИ, доминировавшего в эти годы[689]. Сторонники этого подхода стремились изложить человеческие знания в виде наборов правил и алгоритмов.

На заре шахматного программирования бытовало забавное заблуждение о том, что программист не может создать программу, которая будет играть в шахматы сильнее своего создателя. Тьюринг сравнивал это с утверждением, что ни одно животное не может проглотить животное

тяжелее себя[690]. Возражения Тьюринга, в его время разумеется, могли носить только теоретический характер — на протяжении многих десятилетий машины играли в шахматы на любительском уровне, выполняя для шахматных экспертов роль безропотных учеников, в точности следующих рекомендациям учителей. Проблема, как и в случае процесса обучения людей, заключается в том, что рассказ эксперта о своём методе вовсе не равен самому методу. Обычно человек способен отличить на картинке хрен от пальца, но стоит вам попросить его объяснить, как именно он это делает, а потом начать следовать описанному способу, как вы немедленно запутаетесь и в хрене, и в пальцах.

Однако вплоть до 1990-х гг. преимущество «человеческого» способа игры в шахматы было очевидным, а возможность изобретения принципиально иного подхода — нет. Именно поэтому, создавая шахматные программы, их авторы в той или иной мере пытались подражать в них игре людей. Шахматный мастер тоже просчитывает варианты, оценивает позиции. Более того, люди попытались разложить эту оценку на отдельные элементы задолго до появления даже проектов первых шахматных программ. Уже в XVII–XVIII вв. в работах мастеров итальянской шахматной школы, таких как Пьетро Каррера[691] и Джамбаттиста Лолли[692], мы встречаем попытки численной оценки относительной силы шахматных фигур. Задачу формализации оценки позиции и способа отбора вариантов для анализа нужно было выполнить для того, чтобы обучать начинающих шахматистов, и неудивительно, что наработанные методы легли в основу алгоритмов первых шахматных программ. Однако пионеры шахматного программирования немедленно столкнулись с тем, что многие, казалось бы, самоочевидные для людей понятия были определены недостаточно строго. Если с материалом всё было более-менее ясно, то понятия слабого поля, слабой пешки, защищённости короля, активности фигур было непросто переложить на язык строгой математической логики. Ещё хуже дело обстояло с отбором перспективных вариантов для анализа. Как выяснилось, этот процесс шахматные мастера осознают весьма слабо — выбор основывается на интуиции, являющейся порождением опыта, и эта самая интуиция оказалась совершенно неуловимой и каждый раз, подобно солнечному зайчику, ускользала от попыток описания на не терпящем неоднозначностей и сомнений языке математических формул. Впрочем, в те годы никто не знал наперёд, что эти отважные донкихотские попытки обречены на неудачу. Тем более что во главе этого направления стоял один из патриархов советской шахматной школы — Михаил Ботвинник, шестой чемпион мира по шахматам.

Интерес к компьютерным шахматам развился у Михаила Моисеевича довольно рано. В 1958 г. по приглашению гроссмейстера Макса Эйве, пятого чемпиона мира по шахматам, Ботвинник посетил Нидерланды, где стал гостем телепередачи, посвящённой компьютерам и перспективам их применения. На вопрос Эйве *«Будет ли машина играть в шахматы сильнее человека?»* Ботвинник не задумываясь ответил: *«Да!»*[693, 694]

Эйве был не только блестящим шахматистом, но и специалистом в области компьютерных технологий. В 1956 г. он занял пост консультанта в нидерландском отделении компании Remington Rand — одного из ведущих разработчиков первых ЭВМ[695]. Тремя годами позже Эйве стал директором Исследовательского центра по автоматической обработке данных, а ещё через два года — главой созданной Евратомом * комиссии, изучавшей шахматный потенциал компьютеров[696].

Вспоминая в книге «От шахматиста к машине» телеинтервью 1958 г., Ботвинник писал: *«Известно, что всё начинается от Евы… Но в моей творческой деятельности многое начиналось не от Евы, а от Эйве. Именно он осенью 1934 года выхлопотал приглашение на рождественский турнир в Гастингс — это был мой первый международный турнир. И вот теперь после вопроса Эйве я стал думать, как же обучить компьютер хорошо играть в шахматы?»*

В ноябре 1960 г. с подачи директора XIV шахматной олимпиады Герберта Гретца Ботвинник прочитал лекцию в Университете Гумбольдта[697], которая позже была опубликована в советской прессе под названием «Люди и машины за шахматной доской»[698]. В начале 1960-х активно обсуждался вопрос о том, можно ли создать машину, способную играть в шахматы на гроссмейстерском уровне. Первые программы играли на уровне слабых любителей, и было неясно, что именно нужно сделать для того, чтобы преодолеть этот разрыв. Было ясно, что задачу нельзя решить при помощи полного перебора (пусть даже и с альфа-бета-отсечениями) — количество рассматриваемых вариантов нужно было сокращать самым радикальным образом. При этом было понятно, что подобное агрессивное сокращение дерева перебора возможно лишь ценой заведомо «некорректных», потенциально опасных отсечений. Именно такого рода ошибки допускают люди-шахматисты, упуская в своём анализе тот или иной важный вариант. Гроссмейстер, рассчитывающий комбинацию из двадцати полуходов, анализирует разве что несколько десятков позиций. Но это значит, что его анализ включает лишь порядка одной из 10^{28} возможных альтернатив. Лучшие шахматные программы начала 2010-х гг., несмотря на все достижения в области селективного перебора, рассматривали примерно в миллион раз больше позиций для достижения того же результата.

Впрочем, в этих сравнениях есть достаточно много условностей. Под рассмотрением шахматистом той или иной позиции в ходе расчёта вариантов мы понимаем только сознательное рассмотрение, дипломатично умалчивая о том, что часть анализа происходит и на бессознательном уровне. Если шахматист оценил последовательность из нескольких взятий на некотором поле, значит ли это, что он рассмотрел соответствующее число позиций? Так же и при подсчёте количества позиций, принятых в рассмотрение машиной, существует множество разночтений в способах такого подсчёта. В зависимости от принятых соглашений число вариантов, рассматриваемых машиной,

* Европейское сообщество по атомной энергии.

3.5.6

Рассуждения о теоретической основе шахматного программирования и идеи Ботвинника

можно уменьшить или увеличить на несколько порядков. Кроме того, в определённых ситуациях оценочная функция может успешно подменять собой рассмотрение конкретных вариантов. Оценочные функции шахматных программ второго поколения могли включать в себя, например, «правило квадрата» — простой геометрический принцип, позволяющий оценить, успевает ли король перехватить проходную пешку в пешечном эндшпиле. Тот же результат мог быть получен анализом конкретных вариантов, причём в ряде случаев этот анализ нужно было бы осуществить на достаточно большую глубину. То же самое можно сказать о таблицах окончаний: программа просто извлекает из базы точную оценку позиции без всякого перебора. Обладая некоторой фантазией, можно представить себе сложную оценочную функцию, позволяющую эффективно заменить перебор вариантов. Например, в современных программах оценочная функция может ценить сильную атаку на короля или сильные проходные пешки куда выше, чем несколько лишних пешек или даже лишнюю фигуру, благодаря чему программа способна без глубокого перебора принять решение об осуществлении вполне «талевской жертвы» (Михаил Таль, восьмой чемпион мира по шахматам, любил острую игру и часто осуществлял некорректные жертвы. Однако при этом Таль часто побеждал, потому что противнику при ограниченном временном контроле и волнении опровергнуть такую жертву было непросто. Тогда говорили: *«У соперников Таля всегда находится выигрыш, причём всегда… лишь в анализе после партии!»*). Сам Таль относился к этому с присущим ему юмором: *«Есть два вида жертв: корректные и мои!»*[699] Также программы второго поколения могли включать в рассмотрение довольно длинные цепочки «форсированных» ходов, например шахов, взятий, превращений пешек и так далее. Поэтому даже программа ИТЭФ вполне могла найти сравнительно длинную выигрывающую комбинацию при глубине перебора всего в три полухода, если, например, после трёх «тихих» ходов следовала цепочка из десяти форсированных[700].

Однако Ботвинник был сторонником более решительного подхода. Будучи шахматным профессионалом высочайшего уровня, он был убеждён в том, что сможет изложить методы, применяемые шахматными мастерами, в виде соответствующих алгоритмов. Однако уже после первых шагов, сделанных в этом направлении, Ботвинник натолкнулся на целый ряд сложностей. Одной из первых его идей стало выделение «главного участка боя» (ГУБ) — множества фигур и полей, на которых идёт игра. Эту идею Ботвинник изложил Баширу Рамееву, главному конструктору ЭВМ «Урал», и в ответ на свои соображения получил убийственный вопрос: *«А как вы будете определять этот самый ГУБ?»*

Несмотря на первое разочарование, Ботвинник не был намерен сдаваться — предмет исследований решительно увлёк его. Ознакомившись с принципами работы ранних шахматных программ, он выдвинул ряд нетривиальных идей. Первой стало замечание о том, что шахматные программы ведут перебор вариантов, не имеющих определённой цели. Программа обрывает перебор варианта механически, достигая его максимальной длины,

в то время как анализ варианта шахматным мастером обычно завершается позицией, в которой была достигнута или не достигнута изначально сформулированная промежуточная цель. В качестве такой промежуточной цели Ботвинник предлагал использовать выигрыш материала (т. е. фигур или пешек). Соответственно, идея в общих чертах заключалась в том, чтобы анализировать варианты, представляющие собой траектории перемещения атакующих фигур и «фигур-мишеней».

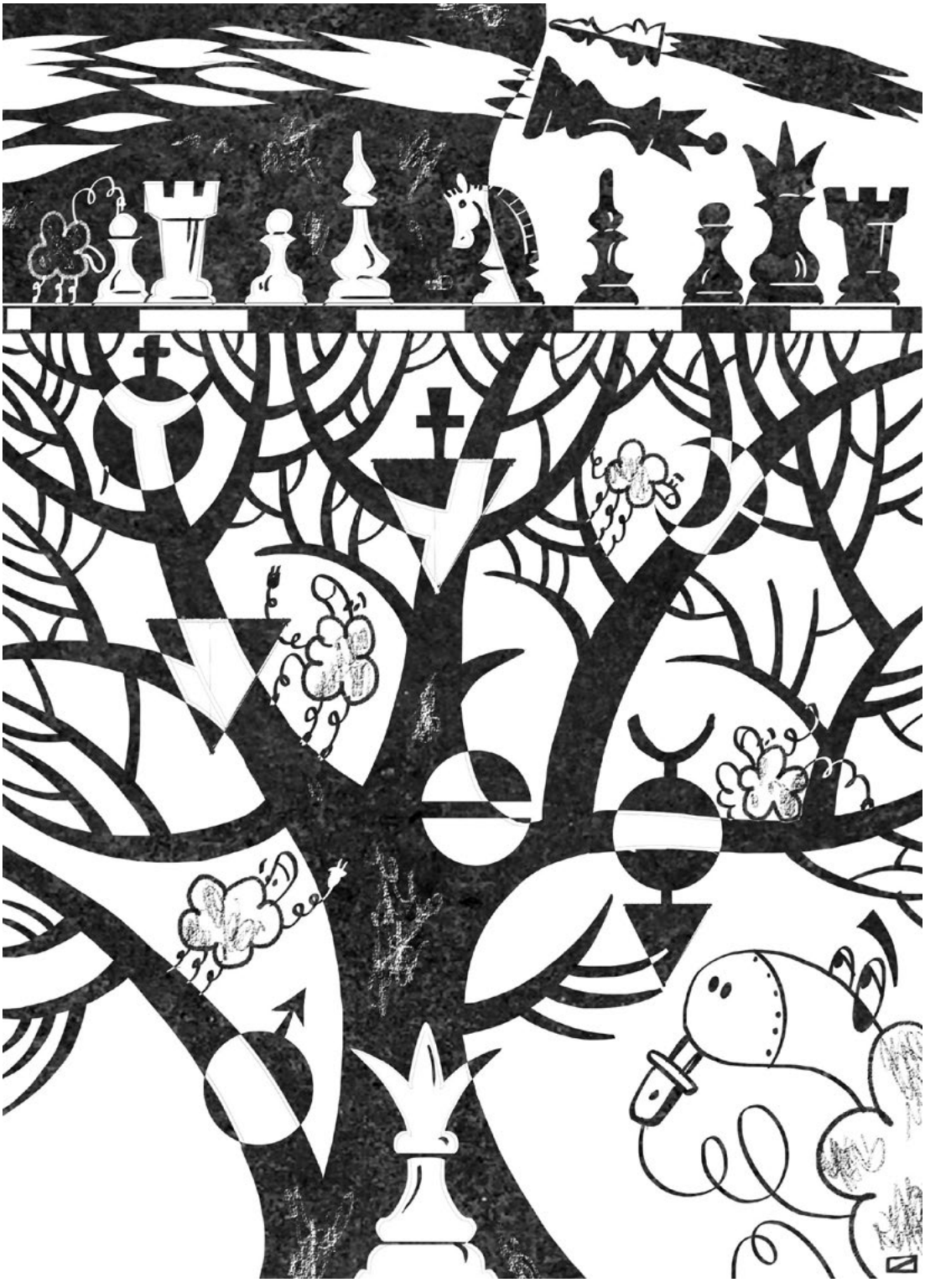
В 1965 г. во время визита в Москву Клода Шеннона, ставшего к тому времени знаменитостью среди советских математиков, Ботвинник встретился с американским учёным и сыграл с ним партию в шахматы[701]. Переводчиком на этой встрече был Лотфи Заде — американский математик и логик азербайджанского происхождения, автор термина «нечёткая логика» и один из основателей теории нечётких множеств. Москва 1965-го была полна американских информатиков.

Вот как вспоминал сам Ботвинник состоявшийся между ними диалог: *«Цель игры — выигрыш материала. Это хорошо, — сказал Заде. — Но ведь целей и траекторий, по которым можно пробиться к этим целям, превеликое множество! Как же вы собираетесь ограничить информацию об этом?..*

Рис. 71. Встреча Шеннона (за шахматной доской слева) и Ботвинника (за шахматной доской справа), 1965 г.

Я сказал Заде, что давно уже об этом думаю, даже знаю, как назвать это ограничение — „горизонт“ (Заде одобрил термин), но ещё его не формализовал...»[702]

Идея траекторий всерьёз увлекла Ботвинника. Вскоре он дал формальное определение «горизонта» (не путать с «эффектом горизонта»!) как предельно допустимого времени (в полуходах), которое дано для взятия неприятельской фигуры. Статья Ботвинника с описанием его идей после долгих споров была опубликована в «Бюллетене Центрального шахматного клуба СССР» в порядке обсуждения[703]. Идеи Ботвинника встретили достаточно жёсткую оппозицию со стороны математиков и программистов. Позже в своих воспоминаниях Михаил Донской назовёт поставленную Ботвинником задачу научить компьютер мыслить как человек безумной и неконструктивной[704]. Градус споров был вполне понятен — речь шла о том, на что следует расходовать машинное время, ценившееся в те годы на вес золота. Недостаточно формализованные идеи Ботвинника вызывали раздражение у большинства программистов: им было понятно, что для того, чтобы превратить идеи Ботвинника в чёткий алгоритм и работающий машинный код, нужно потратить много времени и сил, причём положительный исход этого вовсе не гарантирован.



Впрочем, сам Ботвинник был полон энтузиазма. Вот как вспоминает свою первую встречу с ним будущий двенадцатый чемпион мира по шахматам Анатолий Карпов:

На первом же занятии он как бы между прочим сообщил нам, что начал работать над шахматной программой для ЭВМ, которая через несколько лет начнёт обыгрывать не только мастеров, но и гроссмейстеров, а со временем не оставит шансов и чемпиону мира. Говорил он спокойно, убеждённо и аргументированно. Мы — дети — поняли только одно: мэтр сошёл с дистанции, но вместо себя готовит бездушного шахматного киборга, который расправится со всеми и снова возвысит имя своего создателя. Шокированные, мы на несколько секунд притихли, а мастер, заметив произведённое впечатление, окинул нас сильным, холодным и уверенным взглядом и сказал:

— Не волнуйтесь, ребята! Сама по себе моя машина не заработает. В неё надо вдохнуть жизнь, вложить душу, а сделать это смогут только талантливые шахматисты — программисты. Вот вы и будете первыми[705].

В 1968 г. в издательстве «Наука» вышла книга Ботвинника, название которой — «Алгоритм игры в шахматы» — звучало как ответ критикам, однако, вопреки заголовку, книга не содержала законченного алгоритма шахматной программы. В предисловии к английскому изданию книги её переводчик Артур Браун, научный обозреватель газеты *The New York Times*, высказался о содержании следующим образом: *«Я думаю, что эта книга является фундаментальной [seminal] работой. Как и все начала [seeds], она компактна, безотлагательна [urgent] и загадочна [cryptic]»*[706]. Впрочем, в среде математиков и программистов нашлись и те, кто по крайней мере с осторожным энтузиазмом встретил идеи Ботвинника. К ним относились, например, выступивший в роли редактора книги уже знакомый нам Николай Криницкий[707], соавтор Анатолия Китова, а также новосибирский программист Владимир Бутенко, позже создавший собственную шахматную программу «Эврика»[708].

В числе тех, кто проявил интерес к идеям Ботвинника, был также член-корреспондент АН СССР Алексей Ляпунов, один из основоположников кибернетики, который пригласил Ботвинника выступить на семинаре в Новосибирском государственном университете. Вот что пишет об этой истории сам Ботвинник:

Каким образом узнал Алексей Андреевич о моей работе по шахматной программе — не знаю, скорей всего, от нашего общего друга Н. А. Криницкого. После того как в 1968 году вышла книжка «Алгоритм игры в шахматы», Ляпунов прислал письмо, где настаивал, чтобы я сделал доклад на его семинаре.

Это было весьма неожиданно. Большинство математиков относилось к моей работе с вполне обоснованным скепсисом: личность как шахматиста-профессионала, так и «электротехника-любителя» казалась им неподходящей для исследований в области кибернетики, а необычные идеи — более

чем сомнительными. Лишь профессор Криницкий занимал чёткую и благожелательную позицию, но сколько часов мы затратили с ним на жаркие споры, прежде чем стали единомышленниками!.. И вот сам Ляпунов приглашает приехать в Новосибирск!

Доклад на семинаре был в сентябре 1969 года.

Дальнейшее развитие идей Ботвинника было связано (во многом под влиянием замечаний Ляпунова, сделанных им на семинаре) с введением понятия зоны игры[709]. Она включала в себя атакующую фигуру (для неё был придуман специальный термин — «комлевая», «комель» — это часть растения, рога, пера или волоса, прилегающая к корню), перемещающуюся по комлевой траектории с целью забрать фигуру-мишень, а также две команды «отрицающих фигур», действующих по «траекториям отрицания» и старающихся соответственно помочь либо помешать комлевой фигуре выполнить её задачу.

Как и в случае со многими другими эвристиками, расставить точки над i при оценке разумности применения эвристики может только вычислительный эксперимент. Конечно, при скрупулёзном анализе эвристик Ботвинника у программиста-практика неизбежно возникнет ряд вопросов. Например: если вариант в усечённом дереве игры заканчивается взятием фигуры-мишени, можем ли мы быть уверены в стабильности терминальной позиции? Что, если за этим взятием следует ответное взятие фигуры или даже хуже — мат? Как быть, если комлевая фигура в процессе перемещения по своей траектории перестала, например, защищать другую фигуру, будет ли взятие этой фигуры противником включено в зону игры? Работы Ботвинника не содержат ответов на эти вопросы, как и на многие другие. Но, быть может, при попытке практической реализации подхода Ботвинника можно было найти на все эти вопросы вполне разумные ответы?

В январе 1972 г. академик Аксель Берг помог с открытием научной темы по работе над программой во ВНИИЭ (Всесоюзный научно-исследовательский институт электроэнергетики), где Ботвинник руководил одной из лабораторий. Вопрос с выделением машинного времени был решён, вскоре нашлись и программисты. Ими стали Борис Штильман и Александр Юдин, позже к команде подключились также Михаил Цфасман и Александр Резницкий.

В работе над программой сразу же возник целый ряд трудностей, и набор эвристик стал быстро разрастаться. В то время как Юдин был занят созданием библиотек дебютов и эндшпилей, Штильман пытался воплотить в жизнь идеи Ботвинника о траекториях и зоне игры.

В 1976 г., зная о работе группы Ботвинника, организаторы II чемпионата мира среди шахматных программ прислали ему приглашение, при составлении ответа на которое родилось название программы — «Пионер», предложенное Штильманом (сам Ботвинник предлагал назвать программу «Человек»).

Однако путь к созданию полноценной шахматной программы, основанной на радикальных идеях, был долгим и тернистым. В качестве промежуточной цели Ботвинник хотел добиться того, чтобы программа была способна решать

шахматные этюды, и даже отчитался о некоторых успехах в этой области. Например, «Пионер», по заявлению Ботвинника, мог решить сложный шахматный этюд авторства Гии Надареишвили. Описание того, каким образом было получено решение, вышедшее из-под пера Михаила Моисеевича, внушало сторонним наблюдателям ужас: *«Штильман действовал решительно. Как аэронавт, он стал сбрасывать „балласт“, то есть выключать подпрограммы, не имеющие прямого отношения к этому этюду. Правда, Боря немного увлёкся, он отключал и нужные подпрограммы, так что полного авторского решения получить не удалось. Из-за неведомой технической ошибки никак не удавалось закончить одно поддерево (правда, когда я сообщил Г. Надареишвили об этом казусе, он очень удивился: оказывается, ПИОНЕР формировал важное поддерево, о наличии которого не подозревал сам автор!), и я дал указание запретить ПИОНЕРу его анализировать. Пришлось вновь вводить паллиативные правила, заменявшие отсутствующую позиционную оценку, и в итоге, когда уже и не надеялись на благополучное окончание эксперимента, произошло чудо»*.

В Канаду на чемпионат мира среди шахматных программ 1977 г. Ботвинник отправился не в роли участника, а в роли почётного гостя. Два года спустя он, не теряя оптимизма, писал: *«Итак, остался один шаг до практической игры…»* [710]

Оставаясь верным выбранному направлению, Ботвинник упорно работал над совершенствованием эвристик. На смену «зонам» пришли «цепочки», у фигур появились «пятнышки», присваиваемые на основе анализа «пучков траекторий», как отдельный элемент анализа появилась Mg* — жертвенная комбинация Греко. На непосвящённого читателя нарратив Ботвинника производил впечатление тягостной алхимии. Нарастало напряжение и внутри команды — после ряда конфликтов в конце 1980-х команду покинули Штильман и Резницкий, после чего проект «Пионер» был закрыт, чтобы затем возродиться с другой командой программистов под названием Chess Computer Sapiens («Разумный шахматный компьютер»). Работа над программой продолжалась до самой смерти Ботвинника в 1995 г. К сожалению, единственным непосредственным продуктом работы Ботвинника и его коллег стали статьи, книги, а также заявления о решении нескольких шахматных этюдов.

Перебравшийся в США Борис Штильман стал сотрудником Университета Колорадо в Денвере (University of Colorado, Denver), где продолжил изыскания в области решения сложных переборных задач, опубликовав компендиум своих идей под названием «Лингвистическая геометрия: от перебора к построению». Штильман постарался обобщить конструктивную часть идей, выработанных в работе над «Пионером», рассматривая возможность декомпозиции поисковой задачи на несколько независимых компонентов. Он пришёл к выводу, что некоторые задачи, подобные этюду Рети*, могут быть

* Этюд Рети — знаменитый этюд (белые: Kph8, пешка c6, чёрные: Kpa6, пешка h5), в котором используется неевклидова геометрия шахматной доски: движение короля по диагонали занимает столько же ходов, сколько движение по прямой.

решены при помощи предлагаемого подхода более эффективно, чем при использовании классических подходов.

3.5.7 Прогресс в компьютерных шахматах в конце XX века

Меж тем прогресс в компьютерных шахматах не стоял на месте — в начале 1980-х гг. программы достигли уровня игры профессионалов.

В 1981 г. программа Cray Blitz для суперкомпьютера Cray, созданная Робертом Хайаттом, Гарри Нельсоном и Альбертом Гоуэром, набрала пять из пяти очков в чемпионате штата Миссисипи. В четвёртом туре программа победила бывшего чемпиона штата мастера Джозефа Сентефа, что стало первой в истории победой компьютера над мастером по шахматам в турнирной игре.

Хотя в некоторых источниках Сентеф упоминается как международный мастер, в действительности он имел лишь звание национального мастера *. На момент игры с Cray Blitz сила игры Сентефа, по всей видимости, соответствовала 2160–2180 пунктам. Сегодня доктор Сентеф, уважаемый специалист в области медицины, так вспоминает своё поражение: «*Не лучший момент моей жизни. Я несколько раз обыгрывал Cray Blitz, но [в этот раз] в цейтноте допустил ошибку. Мне не нравится быть печально известным — и всего по одной игре*»[711].

Семь лет спустя предшественник Deep Blue, шахматный компьютер Deep Thought, одержал первую турнирную победу над международным гроссмейстером ** — роль жертвы была уготована Бенту Ларсену.

Конец 1980-х — начало 1990-х гг. были ознаменованы ростом интереса к шахматным программам в среде профессиональных шахматистов. Машины наконец-то стали интересными соперниками. Впервые в истории людям удалось взглянуть на древнюю игру совершенно новым взглядом — с позиции интеллекта, существенно отличающегося от человеческого. И хотя в отношении игры машин часто звучали обвинения в «чрезмерном материализме», «отсутствии стратегического мышления», шахматисты не переставали удивляться тактическим способностям электронных игроков и их уникальной способности защищать, казалось бы, безнадёжные позиции.

На первый взгляд казалось, что программы конца 1990-х мало чем отличались от программ 1970–1980-х. Когда я впервые в 1999 г. погрузился в чтение исходных кодов программы Crafty — наследницы Cray Blitz, созданной Робертом Хайаттом, — я узнал в ней по сути всё ту же «Каиссу» — по крайней мере тогда я не увидел в алгоритмах никаких революционных нововведений. Конечно, за два десятилетия программы научились весьма эффективно

* Сила игры международного мастера соответствует 2400–2500 пунктов Эло, к 1981 г. звание «международный мастер» было присвоено 897 шахматистам.

** Рейтинг Эло свыше 2500, в 1988 г. в мире было 338 международных гроссмейстеров.

использовать многопроцессорные машины и увеличившиеся объёмы оперативной памяти, некоторые ранние идеи оформились в виде общепринятых методов, но в целом казалось, что развитие теории шахматного программирования забуксовало.

Разгадка состоит в том, что в 1970-е сообщество разработчиков шахматных программ на волне всеобщего энтузиазма наработало множество продуктивных идей, на долгие годы вперёд обеспечив потомков материалом для дальнейшего развития.

Наступившая в 1980-х эра персональных компьютеров принесла с собой многократное удешевление машинного времени и во много раз увеличила число программистов. Это привело к двум важным последствиям. Во-первых, значительный прогресс был достигнут в области совершенствования средств разработки: появились удобные инструменты отладки, новые оптимизирующие компиляторы, общедоступные библиотеки функций — всё это позволило повысить качество программного кода, уменьшить количество рутинного труда при написании программ, облегчить процесс последующей их доработки. Во-вторых, программисты 1990-х уже могли себе позволить принятие решений на основе статистически значимых экспериментов. Добавив в программу новую эвристику или изменив значения того или иного параметра, программисты уже могли позволить себе тестовый турнир, в котором новая версия программы могла сыграть несколько сотен или даже тысяч партий. Этого было всё ещё недостаточно в ряде случаев, но по крайней мере позволяло избежать грубых ошибок.

Таким образом, в течение двух десятилетий программисты усердно раскладывали мух и котлеты на причитающиеся им места, в результате чего весь макабрический зоопарк идей оказался исчислен, взвешен и разделён.

Одновременно с развитием программ продолжалось совершенствование микропроцессорной техники. Закономерным продуктом симбиоза программных и аппаратных технологий 1990-х стал амбициозный проект компании IBM — шахматный суперкомпьютер Deep Blue.

История Deep Blue началась в 1985 г. с конфликта, возникшего между Хансом Берлинером и строптивым аспирантом по имени Фэнсюн Сюй по прозвищу Си-Би (англ. CB, сокращение от Crazy Bird — сумасшедшая птица)[712]. Казалось бы, что за пустяк? У кого только не было проблем с Берлинером? Даже президент Кеннеди пострадал от него: в своей знаменитой речи 26 июня 1963 г. он, произнеся по-немецки фразу «Я — берлинец» [Ich bin ein Berliner], якобы вставил в неё ненужный в данном случае артикль ein, тем самым превратив её в заявление «Я — берлинский пончик». Жаль, что это всего лишь городская легенда. А деятельного Ханса Берлинера уж точно никто не назвал бы пончиком. Этот человек сделал для компьютерных шахмат очень много.

Берлинер родился в 1929 г. в Берлине в еврейской семье. После прихода Гитлера к власти семья была вынуждена бежать из страны и переселиться в Вашингтон (Федеральный округ Колумбия, США). Проявивший

незаурядный талант к шахматам, Ханс в 20 лет стал чемпионом округа, а спустя три года выиграл в чемпионате штата Нью-Йорк. В 1965 г. Берлинер победил в V Всемирном чемпионате по шахматам по переписке. В 1974 г. Ханс защитил диссертацию по информатике в Университете Карнеги — Мелона под руководством Аллена Ньюэлла (одного из создателей шахматной программы NSS). Диссертация была посвящена шахматному программированию и озаглавлена «Шахматы как решение проблем: разработка тактического анализатора».

Главным шахматным детищем Берлинера была программа HiTech *. Берлинер занимался шахматным программированием с начала 1960-х гг., когда работал в IBM, и, оказавшись в стенах университета, предложил проект по созданию новой продвинутой шахматной программы.

Первая версия программы демонстрировала неплохой уровень игры, однако испытывала трудности в момент перехода игры из одной стадии в другую (например, из миттельшпиля ** в эндшпиль ***). Это привело Берлинера к выводу, что слабость HiTech заключалась в недостаточной гладкости оценочной функции. Например, в миттельшпиле плохо защищённый король в центре доски — существенная слабость позиции, в то время как в эндшпиле централизованный король обычно является преимуществом. Но где проходит граница между миттельшпилем и эндшпилем? Программа, играющая за сторону, король которой хорошо защищён, в отличие от короля противника, будет стараться максимально оттянуть размен фигур, формально определяющий переход в эндшпиль, и тем самым может критически ухудшить свою позицию. Это было похоже на уже упоминавшийся нами «эффект горизонта» (этот термин, кстати говоря, ввёл Берлинер).

Берлинер уже применял идею повышения гладкости оценочной функции при создании программы для другой игры — нардов. Коэффициент ветвления игрового дерева в нардах существенно выше, чем в шахматах: в каждом из его узлов существует порядка восьми сотен альтернатив[713], причём многие из них равнозначны, так как связаны с различными равновероятными вариантами выпадения игральных костей. При таком обилии вариантов их перебор не может заметно улучшить качество выбора ходов программой, поэтому наличие эффективной оценочной функции является одним из ключевых факторов успеха. Программа для игры в нарды, созданная Берлинером в конце 1970-х, предназначалась для компьютера DEC PDP-10 и получила название BKG. Ранние версии BKG (вплоть до 8.0) играли в целом довольно неплохо, но всё же не могли соперничать с сильнейшими игроками-людьми. В очередной версии Берлинер решил применить новый подход, использующий нечёткую логику для определения фаз

* По неведомым причинам в советских научно-популярных изданиях её именовали на славянский манер — «Хитеч».

** Миттельшпиль (от нем. *Mittelspiel* — середина игры) — следующая за дебютом стадия шахматной партии, в которой обычно происходят основные события.

*** Эндшпиль (от нем. *Endspiel* — «заключительная игра») — заключительная часть шахматной партии, после размена большинства фигур.

игры. Этот подход получил название SNAC (Smoothness, Nonlinearity, and Application Coefficients — «Гладкость, нелинейность и коэффициенты применения»). Использование этого подхода усилило программу в достаточной мере, чтобы Берлинер смог бросить перчатку действующему чемпиону мира по нардам Луиджи Вилле.

В состоявшемся в 1979 г. матче BKG 9.8 выиграла у Виллы со счётом 7 : 1, став первой компьютерной программой, победившей чемпиона мира в какой-либо игре. Впрочем, Берлинер позже утверждал, что победа была в значительной степени обусловлена случаем, поскольку машине больше везло с выпадениями костей. По крайней мере, более поздний анализ показал, что игра Виллы была практически безупречной, в то время как программа в ряде случаев допускала ошибки (которыми Вилле не посчастливилось воспользоваться)[714].

Рис. 72. Ханс Берлинер (на переднем плане) и Карл Эбелинг, разработчики программы HiTech, 1985 г.

В середине 1980-х Берлинер пребывал в расцвете своего творческого периода. В конце 1985 г. его программа HiTech заняла первое место на Шестнадцатом Северо-Американском чемпионате по шахматам среди компьютерных программ, в 1986 г. победила со счётом 2 : 0 международного гроссмейстера по шахматам среди женщин Яну Майлс, а двумя годами позже одержала победу в товарищеском матче со счётом 3,5 : 0,5 над 74-летним гроссмейстером Арнольдом Денкером.

Так какие проблемы могли возникнуть у всемирно известного специалиста с простым тайваньским аспирантом?..

В начале 1985 г. профессор Кунг, куратор (faculty advisor) Фэнсюна Сюя, попросил юношу помочь Берлинеру с одной из технических проблем. Обсуждаемое решение не нравилось ни Берлинеру, ни самому Сюю, который после некоторых раздумий пришёл к выводу, что корень проблемы кроется в самом подходе Берлинера. Фэнсюн предложил радикально новую конструкцию, основанную отчасти на идеях конкурентов мэтра, однако последний отверг подобную новацию. В ответ Фэнсюн Сюй в недипломатичной форме раскритиковал подход Берлинера и заявил, что утратил интерес к проекту. Мудрый Кунг постарался вразумить юношу, объяснив, что ему следовало бы проявить побольше такта. С учётом предшествующих проступков академическая карьера Фэнсюна Сюя была под угрозой, и Кунг настоял на том, чтобы Сюй подготовил детальное обоснование своей идеи в виде технического отчёта и устроил по нему презентацию. Так Фэнсюн Сюй очутился в дивном новом мире компьютерных шахмат[715].

Появление и развитие проекта Фэнсюна Сюя 3.5.8

Несмотря на исключительный авторитет Берлинера в области компьютерных шахмат, Фэнсюн Сюй осмелился вступить в спор с мэтром, и с этого момента в Университете Карнеги — Меллона появился второй шахматный проект — программа, получившая название ChipTest. Вместе с Фэнсюном над проектом работали Томас Анантараман и Мюррей Кэмпбелл. Основой ChipTest стал аппаратный генератор ходов — микросхема, разработанная Фэнсюном на базе СБИС-технологии (сверхбольшие интегральные схемы, Very-large-scale integration, VLSI). В отличие от HiTech, в котором за генерацию легальных ходов отвечали 64 микросхемы (по одной на каждое поле шахматной доски), Фэнсюну удалось запихнуть эту функцию в один CMOS-чип (Complementary metal-oxide-semiconductor, комплементарная структура металл — оксид — полупроводник), благодаря чему шахматная программа, выполнявшаяся на рабочей станции Sun-3/160, могла просматривать около 30 000 позиций в секунду[716]. Персональные компьютеры смогли достичь подобных скоростей лишь во второй половине 1990-х гг.

Публичный дебют ChipTest на XVII Северо-Американском чемпионате по шахматам среди компьютерных программ в 1986 г. оказался довольно скромным — 2,5 очка из 5 и 11-е место среди 16 участников[717]. Но Фэнсюн Сюй и его коллеги не собирались сдаваться. В августе 1987 г. после ряда доработок ChipTest был переименован в ChipTest-M (M означало «микрокод»). Новая версия не только содержала исправление ошибок, найденных в ChipTest, но и была в десять раз быстрее, просматривая 400 000 позиций в секунду на рабочей станции Sun-4. Заслуженной наградой для команды стала победа в Северо-Американском чемпионате по шахматам среди компьютерных программ 1987 г. со впечатляющим результатом — четыре очка из четырёх возможных.

Опыты с ChipTest открыли множество новых возможностей. Взвесив все pro et contra, Фэнсюн Сюй и коллеги приняли решение о разработке новой машины. Она получила название Deep Thought (произносится близко к «Дип Сот», переводится как «Великий думатель» или «Глубокомысленный») — в честь одноимённого компьютера из фантастического романа Дугласа Адамса «Путеводитель хитч-хайкера по Галактике». Первая версия Deep Thought — 0.01 — была готова в мае 1988 г., а версия 0.02 — в ноябре того же года. Новая версия имела два настраиваемых шахматных процессора на базе СБИС, аппаратную оценочную функцию, реализованную на основе FPGA-чипа (Field-Programmable Gate Array, программируемая пользователем вентильная матрица), и была способна просматривать 720 000 ходов в секунду. Именно эта версия в 1989 г. выиграла чемпионат мира по шахматам среди компьютерных программ, набрав пять очков из пяти (обогнав на полтора очка HiTech, разделившую 3–5-е места)[718, 719].

Хотя за Deep Thought и закрепилась репутация машины, побеждающей благодаря «грубой силе», её алгоритмы вовсе не были примитивными. Более того, одна из немногих заметных алгоритмических инноваций в компьютерных шахматах, появившихся в 1980-е, — метод сингулярного поиска (singular search) — была изобретена именно командой Сюя. Идея заключалась в том, чтобы увеличивать глубину анализа для ходов, не имеющих сравнимой по оценке альтернативы. Благодаря этому методу, использующемуся и по сей день, машины способны более эффективно находить сложные тактические комбинации. Например, в одной из турнирных партий 1988 г. Deep Thought нашёл за доской форсированный мат в 19 ходов (что требовало нахождения варианта глубиной в 37 полуходов).

Прогресс в силе игры машин был очевиден. В январе 1988 г. чемпион мира по шахматам Гарри Каспаров, обладатель самого большого в мире рейтинга Эло в 2750 пунктов[720], отвечая в ходе своей конференции на вопрос о том, сможет ли компьютер до 2000 г. победить гроссмейстера в турнирной игре, был весьма категоричен: *«Ни в коем случае, и, если у какого-нибудь гроссмейстера возникнут трудности с игрой против компьютера, я буду рад дать совет»* (речь, разумеется, шла о классическом контроле времени — два часа на сорок ходов, поскольку в более быстрых форматах машины к этому моменту уже не раз одерживали победы над гроссмейстерами). Но если победа HiTech против Денкера в том же году ещё могла вызывать вопросы, то поражение Бента Ларсена в игре с Deep Thought, вкупе с многочисленными победами компьютеров над международными мастерами, обнажило очевидную истину — машины достигли гроссмейстерского уровня игры. Под влиянием неопровержимых свидетельств мнение чемпиона мира об игре компьютеров менялось в течение всего 1988 г. Если в начале года оно было в духе *«компьютеры никогда не победят гроссмейстеров»*, то в середине уже — *«компьютеры никогда не победят сильных гроссмейстеров»*, а в конце — *«ну да, хорошо, Бент [Ларсен] — сильный гроссмейстер, но компьютеры никогда не победят Карпова или меня»*[721].

И всё же в конце 1980-х Deep Thought ещё не был готов к сражению за шахматную корону. Состоявшийся в 1989 г. товарищеский матч из двух партий с Гарри Каспаровым был проигран машиной всухую (0 : 2). Этот же счёт был повторён в матче по переписке с международным мастером Майклом Вальво[722].

Успехи машин в игре против людей привлекали всё большее внимание прессы. Конфликт — отличный инструмент для привлечения медийного внимания. Из пыльного чулана был вновь извлечён старый, уже немного набивший оскомину жупел: противостояние Человека и Машины. Освещение первого демонстрационного матча с Каспаровым в этом смысле также не блистало оригинальностью.

В коротком интервью, предшествовавшем матчу, Каспаров сказал: *«Значение этого матча простирается далеко за пределы шахмат. Это противостояние Человека и Компьютера. Сегодня, наблюдая стремительное*

развитие компьютеров, я думаю, многие люди испытывают страх, очень глубокий, но страх. Что-то вроде того: кто знает, возможно, в будущем компьютеры заменят нас, они будут контролировать нашу жизнь. И шахматы, вероятно, на сегодняшний день единственная область человеческой деятельности, где мы можем сравнить наши возможности и возможности компьютеров»[723].

Позже Сюй так описывал свои впечатления от этой речи: *«Прямой эфир прошёл гладко. Гарри и Deep Thought сделали несколько символических ходов. Неудивительно, что оставшаяся часть интервью была посвящена Гарри. В конце концов, мы с Мюрреем были просто неприметными студентами, только что окончившими аспирантуру. Из слов Гарри у меня сложилось впечатление, что он видит себя в роли защитника человечества от машин. Но когда я посмотрел на своих коллег по команде, то увидел человеческие лица. Мы просто подходили к задаче игры в шахматы с, скажем так, нетрадиционной стороны. Возможно, Гарри требовалась накачка перед предстоящим матчем. Что ж, меня это устраивало»*[724].

У Фэнсюна Сюя и его коллег были все основания для нелюбви к медиа. В декабре 1988 г. Deep Thought разделил с гроссмейстером Тони Майлсом первое место в Открытом чемпионате на приз компании Software Toolworks (The Software Toolworks Open Championship). Пресса отозвалась серией не слишком лестных отзывов на это событие. Доминик Лоусон из британского еженедельника *The Spectator* откликнулся статьёй, озаглавленной «Пентагон играет в шахматы» (The Pentagon plays chess). В ней автор безапелляционно заявлял, что проект Deep Thought финансируется DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency, Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США) и преследует военные цели. Материал был проиллюстрирован изображением ракеты в форме шахматного ферзя[725]. Статья Чарльза Краутхаммера в *The Washington Post* начиналась словами «Новости из XXI века плохие» [The news from the 21st century is not good][726]. Обе статьи цитировали паническое высказывание английского гроссмейстера Найджела Шорта: *«О боже! Может быть, мне стоит начать подыскивать себе вторую профессию. Почему эти люди пытаются испортить нашу игру? Это очень грустно и вгоняет в депрессию»*.

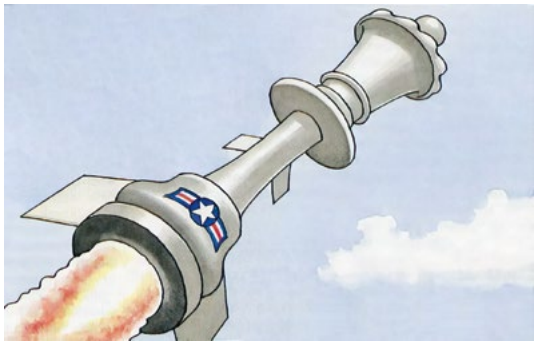


Рис. 73. Иллюстрация к статье Доминика Лоусона «Пентагон играет в шахматы»

Сюй считал, что поражение Deep Thought в мини-матче с Каспаровым в 1989 г. было вызвано двумя обстоятельствами. Во-первых, в программе обнаружилась ошибка, которая заставляла её оттягивать совершение рокировки:

если рокировка была первой в цепочке анализируемых ходов, то все позиции в соответствующем поддереве оценивались как позиции с отсутствием рокировки, что снижало их оценку. Во-вторых, у Deep Thought оказалась слабая дебютная подготовка — сразу на выходе из дебюта машина оказывалась в невыгодных для себя позициях.

Вдохновлённые успехом Каспарова, попытать счастья с машиной Сюя захотели и другие шахматные профессионалы. Результаты оказались довольно любопытными. Из трёх смельчаков наиболее удачливым оказался двенадцатый чемпион мира Анатолий Карпов. Он сыграл с Deep Thought одну партию белыми фигурами и выиграл, хотя и не без труда. Матч из двух партий с немецким гроссмейстером Гельмутом Пфлегером завершился миром — две ничьи. Меньше всего повезло давнему обидчику шахматных программ — Дэвиду Леви. Его фирменная «антикомпьютерная» стратегия «ничего не делать, но делать это хорошо» [do nothing, but do it very well] не раз позволяла ему, не ввязываясь в тактические осложнения, переигрывать электронных соперников позиционно. В 1984 г. Леви с разгромным счётом 4 : 0 обыграл Cray Blitz, теперь же, спустя пять лет, с тем же разгромным счётом он сам потерпел поражение от Deep Thought.

В 1988 г. проектом Deep Thought заинтересовалась компания IBM. Создание компьютера, который смог бы победить чемпиона мира по шахматам, послужило бы компании дополнительной рекламой. IBM предложила Сюю, Кэмпбеллу и Анантараману должности в исследовательском центре компании для продолжения работы над проектом, и в 1989 г. разработчики перешли в IBM.

Вскоре после этого проект сменил своё название. О причинах переименования Сюй красноречиво рассказал на страницах своей книги: *«Первый намёк на потенциальную проблему возник на турнире по компьютерным шахматам, в котором дебютировал Deep Thought, задолго до того, как мы начали переговоры о трудоустройстве с IBM. Это было на чемпионате, организованном ACM в 1988 году. Тони Марсланд, профессор Университета Альберты, вёл панельную сессию во время чемпионата, а я был одним из участников дискуссии. По какой-то неведомой причине, представляя меня, Тони использовал название Deep Throat [Глубокая глотка] как минимум три или четыре раза, хотя каждый раз сразу же исправлял себя»* *.

После матча Гарри Каспарова и Deep Thought жалобы на название программы поступали как изнутри, так и извне IBM. Оказалось, что существует множество людей, которые не могли не думать о «глубокой глотке», когда слышали название Deep Thought. Становилось всё хуже. Жена Мюррея Кэмпбелла Джина работала в католическом колледже. Президентом колледжа была пожилая монахиня, и во время разговора с Джиной она постоянно использовала название Deep Throat.

* «Глубокая глотка» — это кодовое имя информатора журналистов-расследователей из *The Washington Post* в ходе Уотергейтского скандала, а также название фильма, на просмотр которого не стоит приглашать свою маму.

3.5.8

Появление и развитие проекта Фэнсюна Сюя

В качестве нового названия проекта было выбрано Deep Blue. Сам Сюй предпочитал вариант Blue Chips, но это название уже использовалось в одном из проектов IBM[727]. Новое название сохраняло преемственность по отношению к Deep Thought (позже слово *deep* нередко использовалось в названиях многопроцессорных версий различных шахматных программ — Deep Fritz, Deep Shredder, Deep Junior и т. д.) и в то же время удачно перекликалось с неофициальным прозвищем фирмы IBM — Big Blue.

Однако «настоящий» компьютер Deep Blue, основанный на платформе IBM RS/6000 SP2 и СБИС третьего поколения, сыграл свою первую официальную партию лишь в 1996 г.[728], а для первой появившейся в IBM стараниями Сюя и его коллег машины обычно использовалось название Deep Thought II (иногда — Deep Blue Prototype, а во время матча с датской национальной командой в 1993 г. — Nordic Deep Blue). Позже Сюй считал создание Deep Thought II отчасти ошибкой, поскольку эксперименты с ним оттянули на себя время и ресурсы, необходимые для создания главной машины, что, по оценке Сюя, привело к примерно двухлетней задержке в её создании. С другой стороны, именно благодаря Deep Thought II в составе команды появился Джо Хоан — разработчик программного обеспечения Deep Blue, пришедший на смену Томасу Анантараману и внесший очень важный вклад в последующий успех проекта[729].

В 1991 г. в немецком Ганновере на компьютерной выставке CeBIT был организован шахматный турнир из восьми участников: семь немецких гроссмейстеров и Deep Thought II. Это был сильнейший турнир, где участвовала компьютерная программа. Результат Deep Thought II оказался ниже среднего — только 2,5 очка из 7 возможных.

На той же выставке Гарри Каспаров давал сеанс одновременной игры. Принимавший участие в организации соревнований Фредерик Фридель решил воспользоваться случаем и устроить чемпиону мира забавный экзамен. Он показывал Каспарову записи партий каждого из первых пяти туров, а задачей чемпиона мира было находить среди других участников турнира партии Deep Thought. На изучение двадцати партий было отведено 30 минут. По словам Фриделя, Каспаров верно определил игры Deep Thought против Ханса-Ульриха Грюнберга и Вольфганга Унцикера, но не смог распознать его игры против Клауса Бишоффа, Эрика Лоброна и Уве Бёнша. Правда, Фридель заметил, что для партии программы из третьего тура Каспаров почти угадал: вначале он уменьшил число возможных вариантов до Deep Thought или Рая Тишбирека, но потом всё-таки сделал неправильный выбор в пользу партии Тишбирека. Этот случай Фридель счёл за «половину очка» и тем самым решил, что Каспаров угадал в 50% случаев. Хотя Каспаров не был хорошо знаком с игрой немецких гроссмейстеров, но он уже был очень хорошо знаком с Deep Thought. Таким образом, этот эксперимент показал, что, несмотря на часто встречавшиеся в прессе утверждения о «нечеловеческом» стиле игры компьютеров, отличить игру лучшего компьютера от игры лучших шахматистов стало довольно трудно даже Каспарову[730].

В том же 1991 г. на XXII международном чемпионате по шахматам среди компьютерных программ в Альбукерке (Нью-Мексико, США), организованном ACM (всё тот же старый добрый Северо-Американский чемпионат, который переименовали, чтобы подчеркнуть его международный характер), Deep Thought II стал безоговорочным победителем, набрав пять очков из пяти[731]. Скорость просмотра вариантов у Deep Thought II увеличилась по сравнению с его предшественником примерно в десять раз и примерно в те же десять раз превосходила скорость второго по производительности шахматного компьютера — Cray Blitz.

Надо отметить, что всё это происходило в тяжёлое для IBM время. В конце 1980-х развитие персональных компьютеров и сетевых технологий подорвало основной бизнес компании в области мейнфреймов, и, например, за шестилетний период, с 1987 по 1993 год, стоимость акций IBM упала на 77%. Ввиду этого компания запустила процесс масштабной реорганизации. Возглавлявший тогда компанию Джон Экерс рассматривал возможность продажи различных подразделений компании, включая IBM Research. Каждый исследовательский проект подвергался переоценке, и шахматы занимали весьма низкое место в списке приоритетов. Только в 1993 г., когда Экерса на посту генерального директора сменил Лу Герстнер, радикальные меры были отвергнуты. Шахматному проекту удалось выжить.

Дальнейшие результаты Deep Thought II были неоднозначными.

С одной стороны, победы над гроссмейстерами уже не были редкостью: помимо успехов в игре против немецких гроссмейстеров, машина набрала три очка из четырёх в матче против датской шахматной сборной, набрала полтора очка из четырёх в матче против Бента Ларсена, завершила со счётом 1:1 матч с австралийским гроссмейстером Дэррилом Йохансеном, обыграла в одной партии гроссмейстера Майкла Роде и со счётом 1,5:0,5 одолела Юдит Полгар — сильнейшую женщину-шахматистку. *«Мне нужно немного попрактиковаться, и тогда я разберусь с этим!»* — заявила Полгар после матча (дословно: *I will kill it* — «я убью это», но в английском языке *kill it* звучит не так агрессивно, как в русском, так что, возможно, не стоит подозревать Юдит в кровожадном настрое по отношению к машине).

С другой стороны, доминирование не было безусловным. Было ясно, что без доработок прототипу Deep Blue пока что рано претендовать на шахматную корону.

Ситуация также осложнялась успехами конкурентов. В первой половине 1990-х продолжалось совершенствование алгоритмов шахматных программ, благодаря этому победы над сильнейшими игроками-людьми стали под силу не только суперкомпьютерам. Например, в 1993 г. в Гарвардском кубке (Harvard Cup, турнир типа «человек против машины») игравшая на персональном компьютере программа Socrates Exp одержала победу над гроссмейстерами Майклом Роде и Александром Ивановым. Правда, партии игрались с ускоренным контролем (50 минут на партию), и всё же это был впечатляющий результат[732]. В том же соревновании программа MChess одержала победу

над гроссмейстером Патриком Вольффом, а ChessSystem R30 выиграла у гроссмейстеров Майкла Роде и Ильи Гуревича[733, 734]. Таким образом, конкуренты наступали команде Сюя на пятки, что и показал в 1995 г. VIII чемпионат мира по шахматам среди компьютерных программ в Гонконге. Победу в нём одержала программа Fritz, игравшая на обычном персональном компьютере с 90 МГц процессором Pentium, а Deep Blue Prototype пришлось довольствоваться дележом 3–5-го мест[735]. Команда, отправленная IBM в Гонконг для киносъёмки очередного триумфа сильнейшего в мире шахматного компьютера, была вынуждена снять фильм о его оглушительном фиаско.

Самым плохим в этом поражении было то, что IBM планировала на закрытии чемпионата в Гонконге объявить о достигнутой с Гарри Каспаровым договорённости о матче, в котором чемпион мира среди машин должен был встретиться с чемпионом мира среди людей. Поскольку шахматный компьютер IBM формально потерял свою шахматную корону, это грозило резким понижением статуса матча. К счастью, была найдена лазейка — машина Сюя всё ещё оставалась обладателем самого высокого шахматного рейтинга среди компьютеров, поэтому в пресс-релиз были спешно внесены соответствующие уточнения.

Критически важным для команды Deep Blue было успеть получить новые СБИС, которые позволили бы многократно увеличить скорость машины, поскольку стало ясно, что Deep Thought II в его нынешнем виде вряд ли мог наравне состязаться с чемпионом мира. Это вскоре подтвердилось ещё одним обидным поражением — на этот раз от испанского гроссмейстера Мигеля Ильескаса со счётом 0,5 : 1,5. Причиной поражения стала ошибка в алгоритме распределения времени.

Предшествовать выяснению отношений с Каспаровым должен был ещё один матч с участием машины Сюя: на открытии нового исследовательского центра IBM в Пекине 25 сентября 1995 г. Deep Thought II должен был сыграть с Се Цзюнь — чемпионкой мира среди женщин.

Изначально предполагалось, что в этом матче будет принимать участие полноценная система Deep Blue, состоящая из тридцати компьютеров RS/6000, однако этому помешали задержки с изготовлением новых чипов. Когда по мере приближения даты матча стало ясно, что система не будет готова в срок, команда Сюя решила собрать упрощённый вариант системы, состоящий из одного компьютера. В итоге машина выступала в матче под названием Deep Blue Prototype, но на этот раз это был настоящий прототип будущего Deep Blue. Компьютер использовал одну плату шахматного ускорителя, оснащённую двумя шахматными СБИС.

Новые микросхемы и плата ускорителя были доставлены в исследовательский центр IBM имени Томаса Дж. Уотсона всего за несколько недель до начала матча. Новые СБИС были выполнены по технологии 0,6 микрона — в пять раз меньше, чем в микросхемах, использованных Сюем десятилетием ранее. Однако первые тесты показали наличие в чипах ряда дефектов. Чтобы компенсировать их, Сюй был вынужден перепрограммировать плату

ускорителя, что стоило примерно двукратного замедления системы. Все изменения совершались в последний момент. В первой партии матча в системе произошёл сбой, и команда Deep Blue была вынуждена признать поражение. К счастью, во второй партии технических проблем не возникло, и Deep Blue Prototype смогла сравнять счёт — матч завершился с результатом 1 : 1. Трудно представить себе, какое количество седых волос прибавилось на головах участников команды Deep Blue в ходе этих событий.

Вдобавок ко всему организаторов матча заставил понервничать и сам чемпион мира. 11 сентября 1995 г. в здании Всемирного торгового центра в Нью-Йорке начался матч на первенство мира между действующим чемпионом мира Гарри Каспаровым и претендентом — Вишванатаном Анандом. После первых восьми партий, закончившихся вничью, Ананд выиграл девятую партию и захватил лидерство в матче. Каспарову, однако, удалось справиться с ситуацией, и матч завершился его победой со счётом 10,5 : 7,5.

В декабре того же года Каспаров сыграл матч из двух партий с Fritz — обидчиком Deep Thought II на чемпионате в Гонконге. Из-за ошибки оператора (в программу был введён неправильный ход Каспарова) Fritz проиграл первую партию, а вторая завершилась миром.

Больше ничто не препятствовало предстоящей схватке титанов[736].

3.5.9 Первый матч против чемпиона мира

Матч в Филадельфии (США) под эгидой ACM (1996 ACM Chess Challenge), намеченный на февраль 1996 г., должен был стать первым в истории состязанием, в котором человек и машина сойдутся за шахматной доской за звание чемпиона мира. Он состоял из шести партий, а правила были максимально приближены к тем, которые используют люди в аналогичных матчах. Игры должны были пройти при классическом временно́м контроле: каждому из игроков отводилось по два часа на первые 40 ходов партии, по часу на следующие 20 ходов и по 30 минут на оставшуюся часть партии, при этом неизрасходованное время на каждой из стадий игры переносилось в последующие стадии[737].

К моменту начала матча 32-летний Каспаров находился на вершине своей шахматной карьеры — став чемпионом мира в 1985 г., он за десять лет несколько раз успешно защитил свой титул, одержав, в частности, победы в матчах против Анатолия Карпова (1990), Найджела Шорта (1993) и Вишванатана Ананда, а его рейтинг Эло двумя годами ранее достиг рекордного значения среди всех шахматистов в истории — 2815 пунктов (хотя к моменту матча и снизился до 2775)[738].

В качестве места для проведения матча был выбран гигантский конференц-центр Филадельфии. Это здание в прошлом было главным железно-

дорожным вокзалом города. Архитекторы, разработавшие план переустройства сооружения, стремились к созданию чувства исторической преемственности, сохранив, в частности, фрагменты железнодорожных путей на полу главного зала[739].

Каспаров рассматривался ведущими шахматными экспертами в роли бесспорного фаворита матча. Троекратный чемпион Украины и США Лев Альбурт считал, что матч завершится со счётом 6 : 0 в пользу Каспарова[740]. В статье Майкла Антонова, опубликованной в третьем номере журнала *Popular Science* за 1996 г., было приведено мнение Дэвида Леви, который также считал, что Каспаров может выиграть матч со счётом 6 : 0. *«Я бы поставил свою жизнь на это»*, — сказал Леви. В этой же статье цитировалось более осторожное предположение самого Каспарова, который предсказал счёт 4 : 2 в свою пользу. Менеджер проекта Deep Blue в IBM Си-Джей Тань, напротив, считал наиболее вероятным исходом матча 4 : 2 в пользу машины. Самым большим оптимистом в отношении силы игры Deep Blue был Монти Ньюборн — профессор Колумбийского университета, автор шахматной программы Ostrich и председатель Шахматного комитета ACM. Он считал, что компьютер победит со счётом как минимум 4,5 : 1,5[741].

Четвёртого февраля Каспаров прибыл в Филадельфию. Он только что закончил матч против сборной Бразилии и собирался отдохнуть несколько дней, прежде чем приступить к делу. В Филадельфии Каспарова сопровождала

солидная группа поддержки, в которую входил среди прочих компьютерный консультант чемпиона мира Фредерик Фридель. ChessBase и Каспарова связывали довольно тёплые отношения. Программа Fritz, недавний обидчик Deep Thought II, — один из продуктов ChessBase, должна была играть в матче роль «компьютерного комментатора». Для демонстрации оценок Fritz в зале было установлено специальное табло[742].

История Fritz весьма примечательна. Создатель программы Франц Морш стал известен в мире компьютерных шахмат после того, как его первая программа — Nona — дебютировала в 1983 г. в III чемпионате Нидерландов по компьютерным шахматам (Dutch Computer Chess Championship), где заняла почётное четвёртое место среди четырнадцати участников. Год спустя Nona заняла на этом же чемпионате второе место, а в 1985 г. — первое. В 1989 г. очередная версия программы получила новое имя — Quest. В 1991 г. началось сотрудничество Морша с ChessBase. Код программы, изначально предназначенный для процессоров, совместимых с MOS Technology 6502, был перенесён на платформу Intel 8086, и появилась первая версия программы для MS-DOS, получившая название Fritz (или Knightstalker в США; по всей видимости, из-за опасения, что слово *fritz* имеет в США негативную окраску, поскольку использовалось для обозначения немецких солдат во время Второй мировой войны). Дальнейшее развитие программы осуществлялось при деятельном участии разработчика ChessBase Матиаса Файста, и в 1995 г. программа Fritz достигла максимума — описанной выше победы на VIII чемпионате мира по компьютерным шахматам. Сотрудничество Морша и ChessBase продолжалось 22 года, за это время было выпущено тринадцать версий Fritz для MS-DOS, а затем и для MS Windows. После ухода в 2013 г. Морша в отставку под брендом Fritz выходят другие шахматные программы, не имеющие ничего общего с детищем Морша[743].

От лица людей в качестве комментаторов матча были выбраны международный гроссмейстер Яссер Сейраван и международный мастер Морис Эшли. Сейраван, сириец по происхождению, к этому моменту трижды становился чемпионом США (1981, 1986, 1989). В 1986 г. на XXVII шахматной олимпиаде в Дубае Сейраван одержал победу над Гарри Каспаровым, благодаря чему стал членом символического «клуба Михаила Чигорина», состоящего из шахматистов, выигравших хотя бы одну партию с классическим контролем в официальном соревновании у чемпиона мира в период обладания им этого звания[744].

Эшли — другой яркий американский шахматный талант. Уроженец Ямайки, перебравшийся в США в 12 лет, он проявил себя не только в роли сильного игрока, но и в качестве незаурядного шахматного педагога и одарённого комментатора. Спустя три года Эшли выполнит норму международного гроссмейстера и станет первым афроамериканским шахматистом, получившим это престижное звание[745].

Годом ранее Сейраван и Эшли успешно комментировали матч Каспарова против Ананда, и ACM решила привлечь их и к матчу Deep Blue.

3.5.9

Первый матч против чемпиона мира

Национальные флаги, которые часто размещают на столах во время крупных шахматных матчей, в данном случае были в общем-то необязательны, поскольку данный матч не был состязанием людей, представляющих за доской свои страны. Тем не менее, когда Каспаров запросил российский флаг, у команды Deep Blue не было иного выбора, кроме как запросить американский.

Ведущим мероприятия был Монти Ньюборн. Главным арбитром был назначен Майкл Вальво, а его помощником — Кен Томпсон. Каспаров опасался, что во время игры кто-либо может вмешаться в работу компьютера с целью оказать ему помощь, поэтому попросил Фриделя запросить у ACM наблюдателя для осуществления соответствующего контроля. Тань парировал это, высказав предположение, что Каспаров также может получать в ходе матча нежелательную помощь. В ходе последующих переговоров все согласились поручить Томпсону надзор над обеими сторонами.

Восьмого февраля команда Deep Blue прибыла на соревнования вместе с Джо ДеБласи — исполнительным директором ACM и бывшим сотрудником IBM, а также вездесущим Дэвидом Леви. На следующее утро состоялись официальная церемония открытия матча и пресс-конференция. И Гарри Каспаров, и Си-Джей Тань, выступавший от имени команды Deep Blue, выразили оптимизм по поводу собственных шансов. Затем Леви осуществил розыгрыш права выбора цвета в первой партии, который выиграл Каспаров, выбрав после этого чёрные фигуры.

В субботу, 10 февраля, началась первая партия. Впрочем, не обошлось без досадной заминки. Каспаров прибыл на игру за несколько минут до её начала и, проверив, всё ли в порядке, сел за стол, чтобы собраться с мыслями. Когда в три часа дня Майкл Вальво пустил часы Deep Blue, то время пошло, а компьютер — не заработал! Главной проблемой Deep Blue была новизна системы: программа не была в достаточной мере протестирована, и, по всей видимости, в её нутре роилось множество ошибок, затаившихся в ожидании удачного момента. Сою, впрочем, удалось быстро решить проблему, и игра началась ходом e2–e4. В ответ Каспаров выбрал свою любимую сицилианскую защиту. Машина была хорошо подготовлена к этому дебюту благодаря усилиям главного шахматного консультанта команды Deep Blue — гроссмейстера Джоэля Бенджамина. Каспаров быстро разыграл длинный дебютный вариант, но к 17-му ходу выглядел расстроенным. По слухам, глава Профессиональной шахматной ассоциации (ПША) Боб Райс сказал: *«Теперь мы знаем, что Каспаров не нарочно корчит эти рожи, чтобы раздражать своих противников»*.

К 25-му ходу позиция была приблизительно равной. На 26-м ходу ферзь Deep Blue отправился в опасную экспедицию за пешками, ухватив пешку Каспарова на поле b6. На 29-м ходу Deep Blue прибрал к своим электронным рукам ещё одну пешку, что выглядело весьма сомнительно. Тем временем Каспаров готовил мощную атаку на, казалось бы, совершенно покинутого короля противника. Следующие десять ходов напоминали смертельный танец

Холмса и Мориарти на краю Рейхенбахского водопада — малейшая ошибка каждой из сторон могла привести к неминуемому поражению. Победителем из схватки вышла машина, и на 37-м ходу Каспаров был вынужден капитулировать, при этом на его часах оставалось около шести минут до двухчасового контроля, в то время как у Deep Blue был ещё почти час в запасе: мало того что Deep Blue выиграл партию, он ещё делал ходы в среднем примерно в два раза быстрее, чем чемпион мира.

Исход игры ошеломил как самого Каспарова, так и весь шахматный мир. История свершилась. Deep Blue стал первым в мире компьютером, который заставил чемпиона мира признать поражение в официальном соревновании по классическим шахматам[746].

Пресса откликнулась на это событие в привычной для неё технофобской манере — статья в *The Atlanta Journal-Constitution* начиналась словами: «HAL был бы горд» [HAL would have been proud] *,[747].

Сайт матча не выдерживал нагрузки из-за притока посетителей. Вопреки первоначальным ожиданиям он стал на некоторое время самым популярным сайтом интернета, превзойдя даже веб-сайт игры за звание чемпиона Национальной лиги американского футбола (НФЛ)[748].

Победа вызвала невероятный эмоциональный подъём внутри команды Deep Blue. Но все понимали, что впереди было ещё пять игр. Будет ли удача сопутствовать компьютеру и впредь? Был ли Deep Blue действительно сильнее Каспарова? Поскольку игра должна была продолжиться на следующий день и времени на размышления было не так уж много, команда Deep Blue заняла позицию «давайте подождём и посмотрим ещё одну игру, прежде чем делать какие-либо выводы и предаваться чрезмерному оптимизму»[749].

Совсем другая атмосфера царила в лагере Каспарова. По словам Фредерика Фриделя, Каспаров, несмотря на мороз, решил поздно вечером прогуляться по улицам Филадельфии и во время прогулки спросил: *«Фредерик, а что, если эта штука непобедима?»*[750]

Но чемпион мира не был бы чемпионом мира, если бы не мог собраться в критической ситуации. Во второй игре Каспаров, играя белыми, успешно избежал тактических осложнений и в изнурительной шестичасовой партии из 73 ходов смог добиться успеха. Счёт в матче сравнялся.

Обрадованный победой, Каспаров вышел к публике, которая встретила его стоя и с криками «браво!». Впечатлившись победой Каспарова во второй игре, некоторые наблюдатели пришли к выводу, что первая партия была счастливой случайностью, однако сам чемпион не относился к их числу. Он высказал ряд комплиментов игре Deep Blue: *«Мы впервые играем не с компьютером, а с чем-то, что обладает собственным интеллектом»*. И затем добавил: *«Мы столкнулись с новым качеством. Раньше мы играли с маленькими*

* HAL 9000 — вымышленный компьютер из цикла произведений «Космическая одиссея» Артура Кларка, обладающий способностью к самообучению и являющийся примером искусственного интеллекта в научной фантастике; поскольку HAL вступил в конфликт с людьми, его образ нередко использовался в качестве архетипического «злого ИИ».

компьютерами, такими, как наши ноутбуки… это похоже на то, как если бы вы играли с пятилетним ребёнком, а теперь вдруг пришёл большой папочка».

Третья и четвёртая партии, несмотря на упорную борьбу, завершились вничью. Вслед за четвёртой партией, под конец которой чемпион выглядел выдохшимся, в расписании матча был предусмотрен однодневный перерыв. Каспаров хорошо понимал, что одним из его главных врагов является человеческая усталость: *«Я действительно устал. Эти игры отняли много энергии. Если бы я играл в обычном человеческом матче, мой оппонент был бы так же измотан. Здесь же я имею дело со штукой, которая не выдыхается, а просто играет с постоянной силой. Она не становится сильнее, но не становится и слабее. И единственное, что я могу сделать, — это просто отдохнуть завтра, хорошо отдохнуть и поспать»*.

Внимание СМИ к матчу продолжало расти. Тань и Сейраван выступили в популярной телепрограмме «Час новостей с Джимом Лерером» (The NewsHour with Jim Lehrer). Карикатурист Дуг Марлетт из газеты *Long Island's Newsday* изобразил битву Каспарова и Deep Blue, использовав отсылку к поединку между Джоном Генри и паровой дрелью из американского фольклора:

Джон Генри пробил пятнадцать футов,
Лишь девять прогрызла дрель.
…
Но, долбя что есть сил, сердце он износил
И слёг в земляную постель.

[John Henry, he drove fifteen feet
The steam drill only made nine.
…
But he worked so hard that it broke his poor heart
And he laid down his hammer and he died.]

Пятая партия стала переломной в матче. В ней Каспаров, игравший чёрными, отказался от сицилианской защиты и предпочёл разыграть русскую партию (известную также под названием «защита Петрова»), которая после ответа машины перетекла в дебют четырёх коней. Игра развивалась довольно спокойно, пока после 23-го хода Каспаров, неожиданно для команды Deep Blue, не предложил ничью. После непродолжительного совещания Тань принял решение последовать совету Бенджамина и отвергнуть предложение. Игра продолжилась, однако Каспаров быстро захватил инициативу и смог довести партию до победы. Счёт 3:2 в пользу Каспарова означал, что компьютер уже не сможет выиграть матч: в запасе оставалась последняя партия, которую машина должна была играть чёрными, и при наилучшем для неё раскладе команда Deep Blue могла рассчитывать максимум на ничейный результат в матче. Однако чуда не произошло — Каспаров выиграл и последнюю партию, позиционно переиграв противника в славянской защите[751].

Итак, матч завершился с точно предсказанным самим Каспаровым счётом — 4 : 2. Каковы были его результаты и последствия? Несмотря на поражение Deep Blue, акции IBM за время матча выросли на $5,62 — с $113,50 до $119,12, демонстрируя значительно лучшую динамику, чем ценные бумаги конкурентов: Intel и Microsoft. Разработчики машины постарались извлечь максимум пользы из поражения, сконцентрировавшись на устранении обнаруженных слабостей системы, — команде хотелось во что бы то ни стало выиграть следующий матч. Сюй считал, что тактические способности машины в ходе прошедшего матча были на высоте, а основной причиной поражения стала оценочная функция Deep Blue, в которой обнаружилось несколько дефектов. Например, штраф за «пойманного» в углу доски слона был слишком мал, а бонус за слона, находящегося на особом «слабом поле» противника, в некоторых случаях непомерно велик. Однако эти проблемы оценочной функции были, вероятно, лишь вершиной айсберга — кто знал, сколько ещё подобных дефектов скрывалось в недрах логики оценки? Ещё до матча в Филадельфии Сюй сделал ставку на автоматическую подстройку параметров оценочной функции. Этот подход был предложен Шенноном, и впоследствии разработчики ИИ для настольных игр неоднократно пытались воплотить его в жизнь, впрочем без видимых результатов. Возможно, дело было в нехватке вычислительных мощностей, а может быть — в недостатках конкретных алгоритмов или неточности их реализации. Так или иначе, команде Deep Blue хватило смелости для того, чтобы пойти по дороге, на которой никто до них не достиг существенных успехов. Идея заключалась в том, чтобы модифицировать параметры оценочной функции таким образом, чтобы программа при переборе на небольшую глубину успешно «угадывала» как можно больше ходов профессионалов из большой базы шахматных партий. После матча с Каспаровым Сюй провёл множество вычислительных экспериментов, в ходе которых обнаружил, что некоторые из параметров оценочной функции заметно отличались от экспертных оценок их значений. Последующий анализ этих находок совместно с гроссмейстером Бенджамином открыл путь к пересмотру некоторых элементов оценки.

3.5.10 Второй матч против чемпиона мира

Второй матч с Каспаровым должен был состояться в мае 1997 г. в Нью-Йорке, и у команды было не так много времени, учитывая необходимость создания новой версии СБИС. Поскольку у Deep Blue оценочная функция была реализована «в железе», её переработка требовала создания нового чипа. Кроме того, Сюй нашёл возможность выполнять отсечение некоторых «бессмысленных» ходов на этапе генерации их списка «внутри» чипа. Разработка улучшенной

3.5.10

Второй матч против чемпиона мира

микросхемы в столь короткие сроки была весьма рискованным предприятием. У команды не было возможности как следует протестировать новый чип, поскольку программная эмуляция была чрезвычайно медленной — чтобы симулировать всего одну минуту работы чипа требовалось около двух лет вычислительного времени! В итоге не обошлось без косяков. В режиме генерации ходов с отсечениями, в некоторых позициях, где было возможно взятие на проходе, чип генерировал фантомных ферзей, размещая их на полях A1 и A8. Подобные ошибки всегда вызывают ассоциацию с анекдотом про человека, у которого при ударе монтировкой по голове развязывались шнурки *. Решение этой проблемы потребовало знатных плясок с бубном, но в итоге всё закончилось хорошо[752].

Призовой фонд матча 1997 г. был в два с лишним раза больше прошлогоднего: 1,1 млн долларов против разыгранных в Филадельфии 500 тысяч. Изменились и правила его распределения. Перед матчем 1996 г. Каспаров предлагал схему «победитель получает всё», но в результате переговоров стороны сошлись на варианте 4 : 1 (400 тысяч долларов победителю, 100 тысяч долларов побеждённому). В матче же 1997 г. призовой фонд разделялся в пропорции 7 : 4 — это свидетельствовало о том, что Каспаров уже не рассматривал своё поражение как крайне маловероятное событие[753].

Несмотря на весьма сжатые сроки, команде Deep Blue удалось достичь существенного прогресса. Экспериментальная версия машины, «Pico» Deep Blue Junior, основанная на одиночном шахматном чипе, работавшем в замедленном режиме и с отключенным режимом отсечения, была способна анализировать всего от 100 до 300 000 позиций в секунду, что соответствовало скорости самых быстрых персоналок того времени. Несмотря на это, по словам Сюя, она уверенно обыгрывала лучшие коммерческие шахматные программы. Оба мини-матча Deep Blue Junior (версия машины, обладавшая 1/10 скорости полной системы) против гроссмейстеров Ларри Кристиансена и Майкла Роде окончились со счётом 1,5 : 0,5. Причём в матче с Кристиансеном проявилась ошибка, из-за которой машина в один прекрасный момент выбрала случайный ход вместо сильнейшего — и в результате на ровном месте лишилась пешки. Однако благодаря своим тактическим умениям Deep Blue Junior удалось свести игру к ничейному результату[754].

Благодаря произведённым доработкам частоту шахматного чипа Deep Blue удалось увеличить с 16–20 МГц в версии, использовавшейся в Филадельфии, до 24 МГц. В январе 1997 г. IBM анонсировала новый процессор, Power Two Super Chip (P2SC) для RS/6000 на основе архитектуры RISC, с частотой 130 МГц, что сделало компьютеры, составляющие основу Deep Blue (всего их

* Сотрудник автоинспекции тормозит всех подряд и задаёт один и тот же вопрос:
— Если я у тебя свечу выкручу, какое колесо спустит?
— Не знаю...
— Не знаешь правил — плати штраф!
И так весь день, пока не остановил «запорожец»:
— Если я у тебя свечу выкручу, какое колесо спустит?
— А если я тебе монтировкой по голове ударю, какой шнурок развяжется?

было 30), примерно в два раза быстрее по сравнению с теми, которые использовались годом ранее. Каждый компьютер был оснащён гигабайтом оперативной памяти.

Общим результатом всех усовершенствований стало увеличение скорости машины примерно в два раза, за счёт чего скорость перебора достигла примерно 200 млн позиций в секунду.

Эксперименты, проведённые Робертом Хайаттом, показывали, что для его программы, Crafty, удвоение скорости означало прибавку примерно в 100 пунктов рейтинга Эло. По всей видимости, эффект для Deep Blue должен был быть примерно таким же[755].

Каспаров, впрочем, тоже не сидел сложа руки. Если в 1996-й он вступил с рейтингом Эло, равным 2775 пунктам (Владимир Крамник имел такой же рейтинг, а Анатолий Карпов отставал всего на пять пунктов), то в январе 1997-го Каспаров со своими 2795 пунктами стал единоличным лидером рейтинг-листа FIDE, оторвавшись от ближайшего преследователя Вишванантана Ананда на целых 30 пунктов.

Перед началом матча-реванша было дано множество прогнозов. Знаменитый шахматный комментатор Шелби Лиман заявил, что *«поставил бы свои деньги на Каспарова»*, с ним соглашался Яссер Сейраван: *«Каспаров победит и выиграет быстрее и легче, чем в прошлый раз»*[756]. Марк Сейлор, шахматный мастер и редактор раздела развлечений *Los Angeles Times*, писал: *«Я прогнозирую, что Каспаров не просто победит, а победит без особого труда. Хотя об этом не говорят ни итоговый счёт, ни комментарии Каспарова о том, насколько изнурительным был матч. Он намерен в следующем году подбить IBM на ещё одну попытку с ещё одним выгодным для него призовым фондом»*. Он также добавил, что *«до некоторых пор IBM продолжит использовать состязание человека и машины в целях пиара. Но, если компания в конце концов придёт к выводу, что Каспаров продуманно хитрит, она, вероятно, сдастся и сосредоточится на продаже большего количества RS/6000 для сетей продуктовых магазинов, чтобы компьютеры смогли вернуться к тому, для чего они предназначены»*. И наконец он озвучил характерное для того времени мнение, выдающее желаемое за действительное: *«Современные программы в своём развитии вскоре выйдут на плато, обусловленное ограничениями вычислительной мощности при анализе игры»*[757].

Дэвид Леви выдал прогноз с точностью до половины очка: *«Я прогнозирую, что он выиграет по крайней мере со счётом 4,5 : 1,5. Каспарову будет легче применить на практике то, чему он научился в прошлый раз, чем команде Deep Blue»*[758]. Жужа Полгар высказалась туманно: *«Компьютер лучше, но Гарри тоже лучше»* (The computer is better but Garry is better also)[759].

Сам Каспаров выразил уверенность в своих силах: *«Я решительно намерен победить его»*, добавив: *«Некоторое время мы ещё будем побеждать машины»*[760].

Едва ли не единственными, кто считал, что у машины есть шанс, были члены команды Deep Blue.

3.5.10

Второй матч против чемпиона мира

В ходе предматчевой пресс-конференции один из репортёров спросил Каспарова, насколько сильным он считает Deep Blue по сравнению с коммерческими шахматными программами. Каспаров предположил, что Deep Blue выиграет восемь из десяти игр против лучших коммерческих шахматных программ. Однако в действительности примерно такие результаты демонстрировал «Pico» Deep Blue Jr, который был в тысячу раз медленнее полной версии машины. Услышав заявление Каспарова, Сюй пришёл к выводу, что тот серьёзно недооценивает силу игры машины[761]. В действительности дела, возможно, обстояли не столь просто. Рассуждая о силе игры человека или шахматной программы, мы неявно полагаем, что эта сила может быть представлена некоторым вещественным числом (например, рейтингом), то есть всех игроков можно расположить в виде точек на числовой прямой таким образом, что все точки левее данной будут соответствовать более слабым, а все точки правее данной — более сильным игрокам. Однако вполне возможна парадоксальная ситуация, когда игрок А будет систематически выигрывать у игрока Б, игрок Б — у игрока В, а игрок В — у игрока А.

Измерение силы игры при помощи системы рейтингов, подобной рейтингам Эло, напоминает попытку измерения человеческого интеллекта при помощи такого показателя, как IQ. В действительности при решении различных интеллектуальных задач люди демонстрируют разные способности. Охотник, выросший в традиционном обществе охотников и собирателей, скорее всего, не продемонстрирует выдающихся результатов при решении абстрактных математических головоломок, но, когда дело дойдёт до необходимости выследить и обмануть зверя на охоте, он даст большую фору любому городскому умнику. Поэтому порядок, в котором расположатся люди по результатам прохождения теста на уровень интеллекта, будет зависеть в основном от того, в какой пропорции в тесте будут представлены задачи того или иного типа. По этой же причине программа, оторвавшаяся в соревнованиях шахматных программ от своих конкурентов на добрую сотню пунктов, гипотетически может продемонстрировать весьма скромный прирост в силе игры против людей. Ведь шахматный игрок решает за доской множество различных задач. По силе игры в острых тактических позициях машины превзошли людей довольно рано, поэтому прирост в силе тактической игры мало что прибавит к силе игры против человека, но может оказаться весьма важным при игре против другой шахматной программы.

Кроме того, важно понимать, что параллельный перебор в случае игр, подобных шахматам, связан со специфическими издержками. Скажем, ускорение в сто раз за счёт параллелизации вовсе не эквивалентно увеличению времени перебора в сто раз в связи с потерей времени из-за передачи данных между узлами и задержек при параллельном доступе к данным.

В качестве места проведения матча-реванша был выбран АХА-Эквитебл-Центр (AXA Equitable Center) — небоскрёб в Среднем Манхэттене, расположенный неподалёку от Таймс-сквер. В этот раз организаторы уделили особое

внимание вопросам безопасности — всего двумя месяцами ранее перед демонстрацией, организованной командой Deep Blue, участники конференции ACM были эвакуированы из конференц-центра Сан-Хосе из-за ложного сообщения о заложенной бомбе. Террористические атаки Унабомбера на американские университеты ещё были свежи в памяти общества, и возможная атака неолуддитов не оценивалась как совсем уж невероятное событие. У входа в комментаторский зал были установлены металлодетекторы, а все передвижения людей в здании тщательно контролировались. К счастью, самой серьёзной проблемой в области безопасности стали электронные письма злопыхателей.

Апелляционный комитет матча состоял из Томпсона, Вальво и Ньюборна, судить же матч должна была Кэрол Джарецки, которая в 1995 г. выступала в качестве арбитра в матче на первенство мира между Анандом и Каспаровым и заслужила доверие последнего.

На Кена Томпсона вновь была возложена обязанность наблюдать за обеими сторонами, чтобы гарантировать, что во время матча никто не взаимодействовал с Deep Blue или Каспаровым ненадлежащим образом.

Майкл Вальво, занимавший пост арбитра в Филадельфии, в этот раз по предложению IBM, согласованному с ACM и Каспаровым, сочетал две роли — комментатора и официального представителя матча. Таким образом, дуэт

Сейравана и Эшли был превращён в трио, чтобы несколько уравновесить однобокую поддержку комментаторами Каспарова. Эшли вёл обсуждение, адресуя вопросы двум своим коллегам[762].

3.5.10

Второй матч против чемпиона мира

Как и в предыдущий раз, на игровом столе в качестве дани традиции были размещены российский и американский флажки. Новшеством стали высокотехнологичные шахматные часы, разработанные специально для Каспарова швейцарской часовой компанией Audemars Piguet. Часы позволяли использовать «фишеровский» контроль времени, то есть режим, при котором за каждый сделанный ход ко времени игрока прибавляется небольшой интервал для того, чтобы даже в цейтноте у игроков оставалось время на перемещение фигур. Впрочем, команда Deep Blue настояла на использовании того контроля времени, который был оговорён ранее, так как опасалась вносить изменения в программу в последний момент.

Цвета для вступительной игры были определены в ходе пресс-конференции за два дня до начала игры. Каспаров выбирал одну из двух идентичных коробок, в первой из которых находилась чёрная бейсболка команды New York Yankee, а во второй — белая. Каспарову досталась белая кепка и, соответственно, белые фигуры в первом раунде матча.

Первоначально предполагалось, что на пресс-конференцию придёт около ста журналистов, но пришло более двухсот, и зал был переполнен. В итоге пришлось перенести пресс-центр на другой этаж здания, в гораздо более просторное помещение. Матч был обставлен как грандиозное шоу, интерес к которому, по мнению одного из ветеранов IBM, превосходил все подобные мероприятия в истории компании, включая даже судьбоносный для неё запуск продаж IBM/360 в 1964 г.

Под проекционными экранами с правой стороны сцены была установлена полноразмерная модель одного фрейма (стойки) суперкомпьютера RS/6000 SP. Она представляла собой деревянный ящик размером с холодильник, возвышающийся примерно на два метра. Внутри такого ящика с лёгкостью мог бы поместиться и сам Каспаров. Настоящий фрейм вмещал до 16 рабочих станций RS/6000. После матча модель была на самолёте отправлена в Калифорнию для съёмки в рекламных роликах.

Первая партия матча началась в три часа дня третьего мая. Каспаров и Сюй, выполнявший роль оператора машины, обменялись рукопожатиями, позволили фотокамерам запечатлеть их улыбки и приступили к делу. В первой партии Каспаров выбрал белыми не самый популярный вариант дебюта Рети, стремясь испытать своего соперника. Чемпион придерживался типичной «антикомпьютерной» стратегии в полном соответствии с рекомендациями Леви — до 29-го хода ни одна из его фигур не покинула своей половины игровой доски. И эта стратегия принесла свои плоды. На 11-м ходу ферзь Deep Blue отправился на поле a5 — в тьмутаракань [Nowheresville], по меткому замечанию Ньюборна. Английский гроссмейстер Дэниэл Кинг назвал ход Фa5 «поистине уродливым ходом» [a truly ugly move]. Ни одна из протестированных мною современных шахматных программ не рассматривает этот

ход в числе наиболее предпочтительных вариантов, но, судя по всему, после него далеко ещё не всё потеряно. Более того, позицию, сложившуюся перед 22-м ходом чёрных, современные программы оценивают скорее в пользу Deep Blue. Однако после неосторожного движения чёрной пешки на g4 и последовавших за этим нескольких ошибок спасти партию было уже довольно трудно, и после непродолжительной борьбы на 45-м ходу Кэмпбелл, сменивший после 40-го хода Сюя за доской, был вынужден признать поражение. Спустя пять лет Сюй считал критической ошибкой 36-й ход чёрных, однако современные программы полагают, что позиция была уже практически безнадёжной уже тремя ходами ранее.

Впрочем, ещё одно событие в первой партии матча, помимо проигрыша в ней, вызвало серьёзную обеспокоенность членов команды Deep Blue: 44-й ход машины, выглядевший как абсолютный нонсенс, был результатом застарелой ошибки в программе, которая, как казалось программистам, давно была исправлена. Теперь Сюю и его коллегам предстояло исправить ошибку на лету, в ходе матча, что было весьма рискованным предприятием. Однако этот ход, возможно, имел неожиданный побочный эффект. Увидев его, Каспаров озадачил свою команду вопросом: почему машина выбрала именно этот ход? Глубокий анализ показал, что имевшиеся альтернативы также вели к поражению. Каспаров предположил, что машина во время партии поняла, что все ходы проигрывают, поэтому неважно, какой именно ход будет выбран. Не исключено, что это привело к неправильной оценке им возможностей Deep Blue и повлияло на ход последующих партий.

Дебютом, разыгранным во второй партии матча, стала испанская партия. Чёрными Каспарову вновь удалось достичь закрытой позиции, и аудитория, находившаяся под впечатлением от первой игры, оценивала положение на доске как весьма невыгодное для машины. Однако в данном случае и Каспарова и комментаторов ждал сюрприз. Джоэль Бенджамин, заложивший в дебютную библиотеку Deep Blue варианты, относящиеся к испанской партии, был хорошо осведомлён о способностях машины в этом дебюте. Услышав критику позиции белых, Бенджамин решил выйти к публике, чтобы вставить шпильку Сейравану, однако пока он шёл из операторской комнаты в зал, комментаторы осознали, что не всё на доске столь уж однозначно, и начали оценивать позицию уже в пользу белых. После упорной борьбы Каспаров признал поражение, и счёт в матче сравнялся.

Интересно, что последующий анализ заключительной позиции второй партии показал, что при идеальной защите Каспаров вполне мог бы рассчитывать на ничью. Однако, по всей видимости, своё слово сказала усталость — недаром испанскую партию иногда называют «испанской пыткой».

Некоторые из ходов машины в партии вызвали у Каспарова подозрения. Почему компьютер не сыграл на 37-м ходу Фb6? Ведь этот ход, на первый взгляд, приводил к выигрышу материала и именно его предпочитали программы, используемые командой Каспарова для анализа позиций. После третьей партии Каспаров обратился к Томпсону, чтобы тот изучил

файлы журналов машины для исключения версии о мошенничестве. Однако Томпсон получил затребованные данные только перед пятой партией матча. Кроме того, они включали в себя не полные файлы журналов, а лишь их фрагменты, касавшиеся ходов, которые Каспаров назвал подозрительными. Всё это ещё больше усилило подозрения Каспарова.

Большому спорту, и шахматам в особенности, всегда был присущ дух подозрительности соперников в отношении друг друга. В 1986 г. во время матча за звание чемпиона мира по шахматам между Карповым и Каспаровым последний пришёл к выводу, что один из его собственных тренеров передавал команде противника информацию о дебютных планах. Сначала он решил, что источником утечки был Геннадий Тимощенко, но, когда Тимощенко покинул команду после 12-й партии матча, по словам Каспарова, «чудеса продолжались», поэтому теперь подозрения пали на другого тренера — Евгения Владимирова. Проиграв три партии подряд, Каспаров озвучил Владимирову свои обвинения, и тот, хотя и отрицал обвинения, покинул команду. Вина Владимирова так и не была доказана.

Ещё раньше подозрения и скандалы были во время матча за звание чемпиона мира 1978 г. в Багио между Анатолием Карповым и Виктором Корчным. На игру Корчной привёз из Швейцарии своё дорогое оливково-зелёное кресло. Виктор Батуринский, входивший в команду Карпова, потребовал просветить кресло рентгеновскими лучами, чтобы убедиться, что в нём нет никаких запрещённых секретных устройств. Для воплощения этого требования

в жизнь организаторам пришлось обратиться в больницу Багио, но в результате исследования не удалось обнаружить ничего, кроме поролона. Вероятно, в отместку Реймонд Кин, секундант Корчного, направил организаторам протест, когда Карпову дали йогурт во время игры, утверждая, что йогурт представлял собой закодированное сообщение. Кин писал: *«Йогурт после 20-го хода может означать: мы рекомендуем вам играть на ничью; ломтики манго могут означать: мы рекомендуем вам отказаться от ничьей; блюдо с маринованными яйцами перепелов может означать: сделайте ход конём на g4 и т. д.»*.

Матч 1972 г. между Бобби Фишером и Борисом Спасским также не обошёлся без подозрений. *The New York Times* сообщила: Москва подозревает, что группа американцев использовала компьютер в Нью-Йорке, чтобы помочь 29-летней звезде США победить, — эти американцы якобы вводили ходы каждой из игр в компьютер, а затем во время матча передавали ответы машины Фишеру[763].

Возвращаясь к матчу Deep Blue — Каспаров, надо отметить, что команда Deep Blue опасалась, что Каспаров сможет, ознакомившись с отладочной информацией, выдаваемой машиной во время обдумывания ходов, лучше изучить своего противника и тем самым получить в игре решающее преимущество. Перед матчем Каспаров не раз выказывал своё неудовольствие тем фактом, что ему не дали возможности ознакомиться с тренировочными партиями Deep Blue. Осознавая тот факт, что профессиональные шахматисты умеют подбирать рецепты борьбы против конкретного соперника, команда Deep Blue стремилась минимизировать доступ Каспарова к значимой информации об игре машины, что, разумеется, лишь подпитывало подозрения. Как поэтически выразился Сюй: *«Предоставление прямого доступа к игровым журналам Deep Blue было бы равносильно поднесению ему кремниевой головы Deep Blue на серебряном подносе вместе с 700 000 долларов в придачу»*. Сегодня, когда журналы матча с отладочной информацией Deep Blue обнародованы, причины выбора машиной смутивших Каспарова ходов вполне ясны: виной здесь был так называемый режим паники. Это ситуация, когда в процессе расчёта основного варианта наблюдается значительное падение его оценки по сравнению с первоначальной, в результате чего машина срочно переключается на менее исследованные варианты, и итоговый выбор хода машиной может оказаться необычным и странным[764]. Кроме того, ходы, вызвавшие подозрения чемпиона, не были решающими в игре.

Третья партия началась экстравагантным ходом Каспарова 1. d3 — это начало носит название «дебют Мизеса» в честь немецкого (а затем — британского) шахматиста Жака Мизеса и относится к числу так называемых неправильных начал, на долю которых приходится лишь около 0,3% партий в турнирной практике[765]. Каспаров решительно стремился избежать дебютных ловушек, подготовленных консультантами Deep Blue, и заставить машину принимать в дебюте самостоятельные решения.

3.5.10

Второй матч против чемпиона мира

Сам по себе ход 1. d3 не является катастрофически слабым и попал в число «неправильных» скорее из-за пассивности — совершая его, белые, по сути, уступают инициативу противнику. Хотя этот ход практически не встречается в играх шахматистов высокого класса, но по иронии судьбы миру компьютерных шахмат, да и самой команде Deep Blue, он был на тот момент уже хорошо известен: в 1984 г. Дэвид Леви в своём лондонском матче с Cray Blitz с успехом применил дебют Мизеса против программы Хайатта[766]. В 1991 г. машинам удалось отыграться, когда во время выставки в Ганновере Deep Thought разгромил Инго Альтхофера, опрометчиво начавшего партию ходом 1. d3[767]. Впрочем, при изучении этой партии трудно отделаться от впечатления, что белые разыграли её исключительно ради смеха. Этот мотив так и напрашивается при изучении научных работ немецкого учёного. Например, в 2013 г. он поместил ведро деталей от конструктора Lego в стиральную машину и стирал их 70 минут при температуре 40 градусов Цельсия без стирального порошка и отжима. Благодаря этому Альтхофер выяснил, какие структуры из кирпичиков образуются в этом случайном процессе. В статье «Случайные структуры на базе кирпичиков Lego и аналоговых процедур Монте-Карло» (Random Structures from Lego Bricks and Analog Monte Carlo Procedures), обобщающей результаты исследования, учёный также выдвигает предположение, что применение обычной стиральной машины к игрушкам может положить начало новому направлению в современном искусстве[768].

По словам Сюя, во времена Deep Thought его команда и сама применяла ход 1. d3 в игре против другой шахматной программы. Несмотря на всё это, комментаторы в зале были шокированы ходом чемпиона мира. Майкл Вальво воскликнул: *«Боже мой!»*, Морис Эшли сказал: *«Хитрый ход. Потрясение потрясений в этом матче. Теперь в этом матче есть всё»*. Яссер Сейраван сделал глобальные выводы: *«Я думаю, теперь у нас есть новый дебютный ход»*.

Впрочем, после пятого хода Каспарова игра вернулась на проторённую дорожку дебютной теории, и на доске возникла позиция, характерная для английского начала. В середине игры Каспаров пожертвовал пешку, получив некоторое позиционное преимущество, которое ему, впрочем, не удалось реализовать. Он отыграл пешку, однако оборона чёрных устояла, и на 48-м ходу стороны заключили мирный договор[769].

Хотя результат третьей партии и не особенно повлиял на расстановку сил в матче, именно после неё конфликт между Каспаровым и командой Deep Blue перешёл в открытую фазу. На пресс-конференции, возвращаясь к событиям второй партии и рассуждая об одном из ходов машины, Каспаров сказал: *«Он напоминает мне знаменитый гол, который Марадона забил в ворота сборной Англии в 1986 году»*[770], *. Несмотря на изящную форму, реплика

* Этот гол вошёл в историю мирового футбола под названием «рука Бога», поскольку на послематчевой конференции автор гола заявил, что спорный гол был забит «отчасти головой Марадоны, а отчасти рукой Бога».

Каспарова прозвучала как прямое обвинение в мошенничестве. Атмосфера в матче 1997 г., в отличие от той, что сложилась в Филадельфии годом раньше, была далека от дружеской — сыграли роль и взаимные подозрения, и недвусмысленная ориентация команды Deep Blue на победу. В интервью *The New York Times*, предшествовавшем матчу, Тань прямо заявил: *«Мы больше не проводим научный эксперимент. На этот раз мы просто будем играть в шахматы»*[771].

Спустя двадцать лет после событий матча в Нью-Йорке Каспаров писал: *«Меня спрашивали „Мошенничал ли Deep Blue?“ несчётное число раз, и я всегда честно отвечал: „Я не знаю“. После двадцати лет самокопания, анализа и изучения откровений участников событий мой ответ „нет“. Что касается IBM, я считаю, что всё то, на что они пошли ради победы, было предательством честной конкуренции, и подлинной жертвой этого предательства была наука»*. Мать Каспарова, Клара Шагеновна, высказалась ещё более категорично: *«Это напоминает мне твой первый матч с Карповым. Тогда тебе пришлось сражаться не только с Карповым, но и с советской бюрократической машиной. А теперь, спустя тринадцать лет, тебе приходится биться с суперкомпьютером и капиталистической системой, которая использует свои методы психологической войны»*[772].

Четвёртая партия матча началась обычным 1. e4 и перешла в защиту Каро — Канн. Вновь, как и в предыдущей партии, Каспаров удачно пожертвовал пешку и развил устрашающую атаку. В какой-то момент многим экспертам казалось, что позиция игравшего белыми Deep Blue не устоит.

В напряжённый момент в операторской комнате появился генеральный директор IBM Лу Герстнер, решивший навестить команду. Оказавшийся рядом репортёр *The New York Times* Брюс Вебер не преминул воспользоваться моментом и попросил у Лу комментарий, который на следующий день был напечатан в газете: *«Я просто думаю, что мы должны рассматривать это как шахматный матч между величайшим шахматистом мира и… Гарри Каспаровым»*[773].

К счастью для команды Deep Blue, машина смогла найти спасение в, казалось бы, безнадёжной позиции, в противном случае пафос комментария Герстнера оказался бы в комичном противоречии с результатом игры. Каспаров так вспоминал события четвёртой партии: *«Создавалось впечатление, словно Deep Blue специально манил меня близкой победой, в то время как сам реализовывал план ничьей. Фигуры на доске постепенно редели, и из-за усталости расчёты давались мне всё тяжелее»*[774]. Четвёртая партия стала также единственной партией матча, в которой Deep Blue пригодились эндшпильные таблицы. Их набор включал у машины все пятифигурные окончания и некоторое количество шестифигурных. В конце партии на доске оставалось восемь фигур, и многие ходы, выбранные машиной, опирались на оценки позиций из эндшпильных таблиц.

Также в данной партии случился следующий эпизод: после 43-го хода Каспарова у машины был только один возможный ход, однако произошёл автоматический перезапуск системы, и машина «задумалась». Удивлённый

3.5.10

Второй матч против чемпиона мира

Каспаров поинтересовался причиной паузы, и хотя получил разъяснение, но позже он, по словам Сюя, жаловался на то, что «постоянные сбои» программы отвлекали внимание и вызывали подозрения.

Автоматический перезапуск Deep Blue был вызван специальным фрагментом кода, который отслеживал загрузку машины в ходе параллельного перебора и, если уровень загрузки падал ниже критического минимума, перезапускал машину. Этот механизм должен был предохранять систему от зависания в случае возникновения взаимных блокировок параллельных процессов. Такая ситуация уже была в третьей партии, но тогда перезапуск остался незамеченным для Каспарова и зрителей.

Предпоследняя, пятая партия матча, состоявшаяся после двухдневного перерыва, началась вариантом Кереса в староиндийской атаке. Аудиторию шокировал 11-й ход машины, когда чёрная пешка на королевском фланге внезапно бросилась в бой[775]. Комментаторы сочли это очередным нелепым компьютерным ходом, а вот Каспаров посчитал, что он как раз не был похож на компьютерный и скорее соответствовал манере игры весьма агрессивного шахматиста[776]. Последующий анализ показал, что ход не был ни особенно сильным, ни особенно «человеческим» — по крайней мере, в 1999 г., когда вопрос об этом ходе вновь всплыл в процессе публичного обсуждения, нашлась как минимум одна программа, которая предлагала в этой позиции сделать тот же самый ход[777]. Я не устоял от соблазна предложить позицию моей собственной программе SmarThink и среди первых предложений увидел тот же самый бросок пешки на h5. Правда, после более обстоятельного анализа SmarThink всё-таки склоняется к вариантам с ходом слона на поле a5 (с идеей перевести его на поле на c7 и лишь затем играть h5) или ходу пешки на поле a5, а затем переключается на ход ферзя на поле c7.

После избранного машиной Сюя хода h5 позиция долгое время оставалась примерно равной, но затем после нескольких позиционных ошибок Deep Blue вновь был вынужден обороняться. Компьютер добился ничьей благодаря угрозе вечного шаха королю Каспарова в тот момент, когда чемпион почти провёл свою пешку в ферзи. Второй раз подряд Каспаров испытал тяжёлое разочарование[778].

Итак, итог матча должен был определиться в последней, шестой его партии, которую Каспарову предстояло играть чёрными. Неслучайно споры о произошедшем в ней не утихают даже спустя два десятилетия. В варианте Стейница защиты Каро — Канн Каспаров на седьмом ходу вместо стандартного для этой позиции хода слона на d6 делает слабый и странный ход пешкой на поле h6, в ответ Deep Blue эффектно жертвует коня на поле e6, и уже после 19-го хода белых Каспаров был вынужден признать поражение[779].

Публика выдвинула несколько в разной степени правдоподобных гипотез о причинах выбора чемпионом своего седьмого хода в партии. Согласно одной из них, Каспаров под влиянием стресса и усталости просто перепутал последовательность правильных ходов в дебюте. Вторая гипотеза была основана на предположении, что Каспаров пытался заманить противника

в ловушку, основываясь на недавней публикации в журнале о компьютерных шахматах, в которой утверждалось, что чёрные могут успешно защищаться после жертвы коня. Третья заключалась в том, что Каспаров выбрал защиту Каро — Канн в последнюю минуту и не был готов к последовавшему в партии сокрушительному удару[780].

Интересно, что современные ведущие программы выбирают ход со взятием конём на e6 практически не задумываясь: и Stockfish, и Komodo, и моя программа SmarThink выдают именно этот вариант с первых же секунд обдумывания, оценивая преимущество белых после него примерно в одну пешку. Но вот для Fritz Морша этот ход оказывается неподъёмной задачкой, Fritz 13SE (последняя версия программы, созданная Моршем) на современной персоналке не может найти этот ход даже после часа обдумывания. Делая ход h6, Каспаров, активно использовавший в своей подготовке Fritz, полагал, что компьютеру нахождение за доской жертвы коня на e6 просто не под силу, а при более спокойном ходе коня на e4 позиция будет складываться в пользу чёрных. Впрочем, мы не знаем, был ли способен Deep Blue найти этот ход во время матча, поскольку жертва коня на поле e6 была просто «домашней заготовкой» и содержалась в дебютной библиотеке машины.

Этот ход компьютера серьёзно подлил масла в огонь споров о том, была ли победа Deep Blue честной и бесспорной. Мигель Ильескас, входивший в команду Deep Blue, в своём интервью 2009 г. сказал: *«Мы изучили все посредственные ходы, подобные 1. e4 a6 или 1. e4 b6, и постарались заложить в машину как можно больше заранее заданных ходов. Мы также добавили удар конём на e6 в защите Каро — Канн, причём сделали это как раз утром перед шестой партией. Да, тем утром мы сказали компьютеру: если Гарри сыграет 7...h6, отвечай 8. К:e6 и не смотри в базу данных. Просто играй, не думай... Это было трагедией для Гарри. Он перемудрил, решив, что машине в теоретической позиции предоставлена свобода выбора хода, который ей нравится, и что ей не понравится жертва фигуры. Он поставил на то, что машине ни за что не понравится жертва фигуры за пешку. И действительно, если бы мы дали ему свободу выбора, компьютер никогда бы так не сыграл. Но Гарри забыл, что в соответствии с контрактом мы имеем право вносить изменения в машину ежедневно. Поэтому машина взяла на e6 немедленно, и я помню лицо Каспарова: он был в шоке»*.

В том же интервью Ильескас упоминает, что IBM наняла русскоязычных охранников, которые должны были пересказывать команде Deep Blue разговоры на публике между Каспаровым и его тренером[781]. Каспаров утверждал, что, будучи в гостиничном номере, обсуждал со своей командой вариант, сыгранный позже в партии. Что, если и там кто-то мог подслушивать?

Впрочем, позже Джоэль Бенджамин опроверг утверждение Ильескаса в отношении шестой партии. По утверждению Бенджамина, он собственноручно добавил в дебютную библиотеку Deep Blue ход К:e6 ещё за месяц до матча, а вовсе не «в то самое утро» перед партией, как утверждал в своём интервью Ильескас[782].

Так или иначе, у Каспарова были вполне резонные поводы для подозрений.

К сожалению, череда взаимных обвинений и подозрений разрушила хрупкую атмосферу совместного научного поиска и здорового спортивного соперничества. Каспаров предлагал организовать новый матч, в котором IBM выступала бы в роли участника, а не организатора, но IBM отказала Каспарову в проведении матча-реванша на предложенных им условиях.

3.5.10

Второй матч против чемпиона мира

Deep Blue больше ни разу не участвовал в соревнованиях, не сыграв более ни одной публичной партии ни против людей, ни против других компьютеров. В 2001 г. машина была окончательно отключена и затем разобрана, а её части были переданы музею Смитсоновского института и Музею компьютерной истории.

Все эти события оставили в общественном сознании горькое послевкусие недосказанности и породили череду мифов и заблуждений в отношении компьютерных шахмат. Матчи 1996 и 1997 гг. привлекли к этой сфере огромное медийное внимание, прожектор хайпа на мгновение выхватил из темноты кусочек парадной витрины, посвящённой успехам в области создания систем ИИ, и вновь практически мгновенно компьютерные шахматы погрузились в плотный мрак, скрывающий от обывателя труд исследователей.

В ответ на слова Монти Ньюборна, сравнившего победу Deep Blue с полётом на Луну, Фредерик Фридель в интервью *The New York Times* сказал: *«Победа Deep Blue над Каспаровым стала важной вехой развития искусственного интеллекта, но IBM совершила преступление, не позволив компьютеру играть дальше. Это всё равно что высадиться на Луне и сразу же вернуться домой, не оглядевшись вокруг»*[783].

Компьютерные шахматы после Deep Blue

3.5.11

К счастью, IBM не была единственным создателем шахматных машин и программ, и после ухода Deep Blue со сцены прогресс не останавливался ни на секунду. Надежды некоторых шахматистов на то, что машины близки к выходу на плато уровня игры, не оправдались. Вскоре выяснилось, что для того, чтобы соревноваться с сильнейшими игроками-людьми, вовсе не нужны специализированные устройства, вполне достаточно обычных персональных компьютеров. В 1997 г. программа Rebel, созданная голландским программистом Эдом Шрёдером, со счётом 10,5 : 6,5 победила в матче гроссмейстера Артура Юсупова[784], а год спустя одолела одного из лучших шахматистов — самого Ананда — со счётом 5 : 3. Программа играла на обычном персональном компьютере, правда не все игры велись со стандартным турнирным контролем времени. Из восьми игр четыре были сыграны при блиц-контроле (5 минут каждому игроку плюс 5 секунд за каждый совершённый ход) — здесь программа победила со счётом 3 : 1. Ещё две партии были

сыграны при ускоренном контроле (15 минут на партию у каждого игрока) — здесь преимущество программы также оказалось троекратным: 1,5 : 0,5. И наконец, оставшиеся две партии были сыграны при стандартном турнирном контроле (два часа на 40 ходов, затем час на доигрывание), здесь Ананду удалось склонить чашу весов в свою пользу — он выиграл одну партию, а вторая завершилась миром[785].

В 2002 г. новый чемпион мира по классическим шахматам — Владимир Крамник — сыграл вничью матч с Deep Fritz 7 (4 : 4)[786], при этом код программы был заморожен за пару месяцев до проведения матча, и копия программы была предоставлена Крамнику для подготовки. То есть Крамник получил возможность в течение двух месяцев практиковаться в игре против будущего противника[787].

В 2003 г. Каспаров сыграл два матча против шахматных программ. Первым стал январский матч против программы Deep Junior, созданной израильскими программистами Амиром Баном и Шаем Бушински. Он завершился счётом 3 : 3 — Каспаров выиграл первую партию, Deep Junior третью, а остальные игры завершились вничью[788]. Заметим, что скорость перебора Deep Junior во время матча составляла порядка 3 млн позиций в секунду, то есть почти в 70 раз меньше, чем у Deep Blue. В ноябре состоялся второй матч, в котором Каспаров в четырёх партиях сразился с X3D Fritz — версией Fritz, оснащённой интерфейсом, основанным на специальных очках, отображавших трёхмерный вид доски, а также голосовым интерфейсом для ввода ходов. Матч также завершился вничью — двумя результативными партиями и двумя ничейными[789].

Рис. 74. Каспаров в специальных очках, отображавших трёхмерный вид доски

В 2004 г. команда гроссмейстеров в составе Руслана Пономарёва, Весели́на Топалова и Сергея Карякина сразилась против команды машин в составе Hydra, Fritz 8 и Deep Junior. Матч закончился разгромом для команды людей: 8,5 : 3,5, единственной победой, записанной людьми на свой счёт, стала победа самого молодого участника, Сергея Карякина, над Deep Junior[790]. Год спустя попытать счастье против той же команды машин решила команда из трёх бывших чемпионов мира по шахматам по версии FIDE: Александра Халифмана, Рустама Касымджанова и уже знакомого нам по матчу 2004 г. Руслана Пономарёва, который в этот раз стал автором единственной победы людей. Итог матча — 8 : 4 в пользу машин[791].

В 2005 г. Hydra разгромила гроссмейстера Майкла Адамса со счётом 5,5 : 0,5[792], а в 2006 г. жертвой Deep Fritz со счётом 4 : 2 пал Крамник[793]. В конце нулевых годов лучшие программы достигли гроссмейстерского уровня игры на мобильных

устройствах. В 2008 и 2009 гг. мобильная версия движка * Hiarcs, игравшая под управлением оболочки Pocket Fritz на мобильном телефоне, становилась победителем турнира Copa Mercosur в Буэнос-Айресе (Аргентина), причём по итогам турнира 2009 г., средний рейтинг участников которого составил 2389 пунктов, программа продемонстрировала «перформанс» (турнирный рейтинг) в 2898 пунктов, завершив турнир с девятью победами и единственной ничьей. В этом турнире поражение от программы потерпели оба участвовавших в нём гроссмейстера — Андрес Родригес Вилья и Сергио Слипак[794]. Движок Hiarcs 13, находившийся «под капотом» Pocket Fritz 4 в турнире 2009 г., перебирал всего около 20 000 позиций в секунду, используя 528 МГц процессор телефона HTC Touch HD, то есть уступал Deep Blue примерно в 10 000 раз[795].

С конца нулевых годов в матчах с шахматными программами людям стали предоставлять фору. В 2007–2008 гг. программа Rybka сыграла несколько подобных матчей, в которых противниками машины выступали гроссмейстеры Яан Эльвест, Роман Джинджихашвили и Вадим Милов. Фора обычно включала в себя пешку и дополнительный ход в начале игры. Эльвест и Джинджихашвили проиграли свои матчи[796], а Милов вышел из борьбы победителем[797].

В 2015 г. движок Komodo провёл серию матчей с форой против ряда шахматных гроссмейстеров и мастеров. Использовались форы в одну пешку, две пешки, качество (ладья за коня) и даже коня. Komodo показал хорошие результаты во всех этих играх, завершив большую часть партий вничью, но выиграв по крайней мере одну партию в каждой из конфигураций[798].

Хотя люди сегодня уже не могут всерьёз соревноваться с шахматными программами в силе игры, прогресс в области шахматного программирования не стоит на месте. Программы соревнуются друг с другом, исследуются новые подходы и алгоритмы, программы помогают профессиональным шахматистам в предматчевой подготовке и последующем анализе турнирных партий. В этой книге мы ещё вернёмся к теме компьютерных шахмат, когда будем говорить об успехах нейросетевых технологий во время новой весны искусственного интеллекта, а также в главе 6.5 о социальном искусственном

* Термин «движок» требует некоторых объяснений. В 2000-е годы окончательно закрепилось разделение шахматных программ на две независимые части — «оболочку» (Graphic User Interface, GUI) и «движок» (engine), связанные между собой при помощи одного из стандартных интерфейсов, например WinBoard или UCI (Universal Chess Interface). Эта практика возникла в 1990-е годы в продуктах ChessBase, в которых оболочка от ChessBase поставлялась с несколькими шахматными движками, такими как Fritz, Junior, Shredder, Hiarcs, связанными с оболочкой при помощи программного интерфейса. Затем эта практика была перенята и остальной частью сообщества компьютерных шахмат. Теперь шахматные программисты могли не тратить время на разработку собственного интерфейса, а сосредоточиться на создании «шахматного мозга» программы, сконцентрированного в её движке. Стандартизация интерфейсов шахматных движков позволила автоматизировать проведение матчей и турниров между шахматными программами, исключив из процесса человека. Теперь движки могли обмениваться ходами внутри единой оболочки, которая выполняла роль своеобразного рефери, наблюдая за расходованием времени, корректностью ходов и при необходимости присуждая результаты игры в очевидных ситуациях. Кроме того, оболочке могли быть переданы некоторые дополнительные функции, например выбор ходов из дебютной библиотеки, что позволяло, например, устраивать турниры программ с одинаковой библиотекой дебютов у всех участников.

интеллекте. Несмотря на кажущуюся простоту настольных игр для современных интеллектуальных систем и постепенный уход от технологий GOFAI, шахматы по-прежнему остаются важным испытательным полигоном для новых технологий в области искусственного интеллекта.

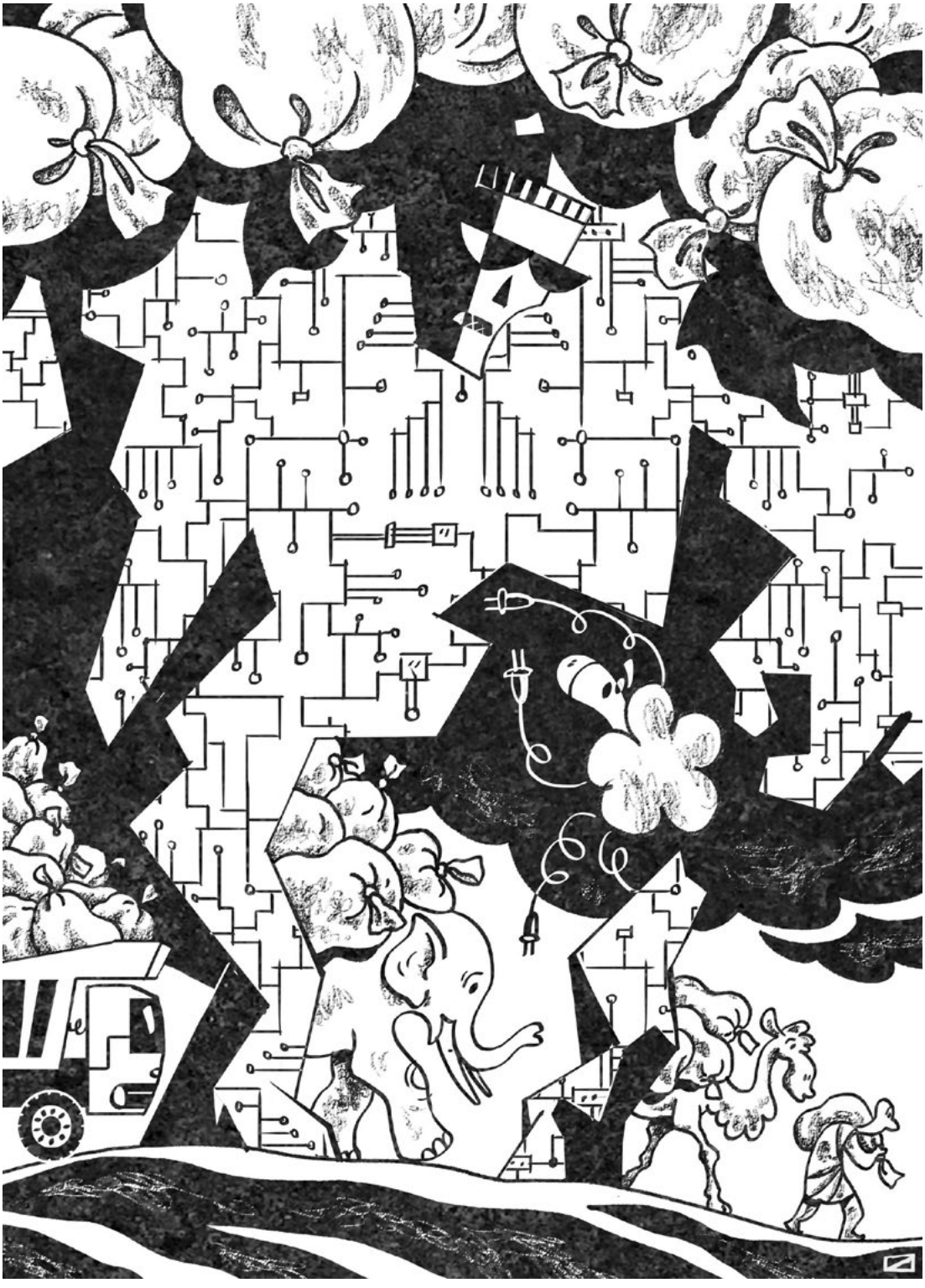
3.6 Грубая сила машины: отделяем правду от вымысла (второе отступление)

> И выступил из стана Филистимского единоборец, по имени Голиаф, из Гефа; ростом он — шести локтей и пяди. Медный шлем на голове его; и одет он был в чешуйчатую броню, и вес брони его — пять тысяч сиклей меди; медные наколенники на ногах его, и медный щит за плечами его; и древко копья его, как навой у ткачей; а самое копьё его в шестьсот сиклей железа, и пред ним шёл оруженосец.
>
> *Первая книга Царств* 17:4–7

При изучении деталей проектов ChipTest, Deep Thought и их наследника Deep Blue первое, что бросается в глаза, — разительный контраст между публичным восприятием этих проектов и их действительным содержанием. В массовом сознании прочно закрепилось представление о проектах Сюя как о дорогостоящих монструозных машинах, очень глупых, но очень быстрых, подавляющих соперников «грубой силой».

Это представление в массовом сознании часто переносят на вообще все шахматные программы. Многие из наших соотечественников, интересовавшихся в детстве и юности шахматами, черпали представления о шахматном программировании из книг и статей Ботвинника, обладавшего в шахматной среде серьёзным авторитетом. Отстаивая собственные идеи, Михаил Моисеевич называл программы своих идейных соперников «полнопереборными». Рассуждая об успехах Deep Thought, которые не мог игнорировать, он не обошёлся без характерной для него колкости: *«Здесь мы имеем не искусственный интеллект, а мы имеем очень работоспособного идиота»*[799].

В действительности шахматные программы никогда не были «полнопереборными», даже бумажная машина Тьюринга при достижении лимита по глубине перебора рассматривала далее лишь форсированные ходы, а значит, спекулятивным образом отбрасывала часть возможных вариантов. Появление альфа-бета-отсечений, эвристики пустого хода, хеш-таблицы перестановок, множества других алгоритмов отсечения и продления перебора



постепенно делало шахматные программы всё более селективными и всё дальше уводило их от «полного перебора». Слова Ботвинника, на мой взгляд, были примером когнитивного искажения, известного под названием «соломенное чучело». Возможно, вы и сами не раз наблюдали, как в споре один из участников искажает точку зрения оппонента, подменяя её похожей, но более слабой или абсурдной — таким образом создавая вымышленный образ оппонента, который и называют «соломенным чучелом». Спорщик затем «доблестно побивает» чучело, стремясь убедить зрителей в том, что была опровергнута точка зрения оппонента.

Представим на мгновение, что Deep Blue действительно был бы программой, перебирающей все возможные варианты. Взяв из шахматного учебника задачу с матом в шесть ходов, которая под силу практически любому перворазряднику, прикинем, сколько потребовалось бы времени Deep Blue, чтобы решить её методом полного перебора. В среднестатистической шахматной позиции возможно примерно 35 различных ходов. Чтобы с гарантией найти мат в один ход, нужно рассмотреть 35 возможных альтернатив, мат в два хода (т. е. в три полухода) — уже $35^3 = 42\,875$ вариантов и так далее. При глубине в 11 полуходов, необходимой для гарантированного нахождения мата в шесть ходов, машине потребовалось бы перебрать 96 549 157 373 046 875 позиций, на что при скорости перебора в 200 млн позиций в секунду понадобилось бы около 15 лет. А ведь отдельные комбинации шахматных мастеров простираются на 10–15 ходов! Если бы Deep Blue действительно был «работоспособным идиотом» такого рода, то вряд ли мог бы соревноваться даже с любителями.

Наверняка многие из вас слышали притчу о зёрнах и шахматной доске. В одной из её версий изобретатель шахмат (в некоторых источниках — Лахур Сесса или Сисса бен Дахир, древнеиндийский мудрец) в награду за своё изобретение просил правителя выдать ему зёрна пшеницы, положив одно зерно на первую клетку шахматной доски, два на вторую, четыре на третью, восемь на четвёртую и так далее. Правитель в ответ сначала смеётся над изобретателем, попросившим столь скудный приз за блестящее изобретение, а затем оказывается потрясён после того, как придворные казначеи сообщают, что общее количество зёрен во много раз превышает все запасы правителя. В итоге в различных версиях окончания притчи изобретателя либо производят в высокопоставленные советники, либо казнят[800]. Примерные подсчёты показывают, что масса зерна должна была составить около 1,2 трлн тонн, что примерно в 1500 раз больше мирового производства зерна в 2017 г.[801]

Теперь представьте себе ту же самую задачу с зёрнами, в которой на каждое следующее поле выкладывается не в два раза, а в 35 раз больше зёрен, чем на предыдущее. Клод Шеннон в своё время попытался прикинуть нижнюю границу числа возможных шахматных партий. Предположив, что один ход, составленный из двух полуходов, предоставляет порядка $1000 = 10^3$ альтернатив, при средней продолжительности партии в 40 ходов Шеннон получил оценку в 10^{120} различных партий[802]. Это число сегодня называют «числом Шеннона». Позже голландский информатик Виктор Аллис уточнил

эту оценку[803], увеличив её на три порядка — до 10^{123}. Для сравнения: число атомов в наблюдаемой части Вселенной составляет порядка 10^{80}, то есть в 10^{43} раз меньше[804]. Правда, различных позиций в шахматах существенно меньше: около $4{,}5 \times 10^{46}$ (современная оценка сверху)[805], а значит, если бы мы научились хранить в одном атоме кремния информацию о том, является ли шахматная позиция выигранной, проигранной или ничейной, то нам бы потребовалось примерно два квинтиллиона тонн кремния, чтобы сохранить сильное решение шахматной игры. В принципе, это не так много, порядка 3% массы Луны. Возможно, наши далёкие потомки когда-нибудь воплотят в жизнь подобный проект ради забавы — конечно, если будут обладать соответствующим чувством юмора. Пока же ни о каком «полном переборе» говорить не приходится.

Для иллюстрации работы современных шахматных программ я проделал небольшой эксперимент. Взяв одну из позиций последней партии второго матча Каспарова с Deep Blue, я заставил свою программу анализировать эту позицию в течение часа. За это время программа успела просмотреть примерно 2 млрд позиций, и самый длинный вариант, изученный ею в процессе анализа, простирался от стартовой позиции на 62 полухода. Это означает, что в игровом дереве глубиной в 62 полухода на один изученный вариант приходилось примерно 3×10^{86} отброшенных. И это не предел: современные программы, использующие нейронные сети при построении игровых деревьев, такие как Leela Chess Zero, могут довольствоваться деревьями размером ещё в 100–1000 раз меньше[806] при том же или более высоком уровне игры.

Разумеется, бесплатных завтраков не бывает, любая эвристика имеет цену. Изменяя порядок изучения вариантов в дереве игры, откладывая «на потом» или вовсе «в никогда» те или иные «неглубокие» бесперспективные варианты в пользу «глубоких» перспективных, любая программа рискует найти решение позже, чем это сделает скрупулёзный полный перебор, или даже вовсе не найти его. Но чем лучше математические модели, лежащие в основе программы, способны оценивать важность той или иной ветви дерева игры, тем менее вероятной становится такая ошибка в практической игре. На деле для любой остроумной эвристики можно придумать не менее остроумный контрпример, но в силу искусственности такого контрпримера его наличие часто оказывает очень слабое влияние на турнирную силу игры программы.

Миф о «полнопереборных» программах породил и другие заблуждения, в плену которых иногда оказываются даже специалисты в области искусственного интеллекта. Например, существует мнение, что над созданием шахматных программ работают крупные коллективы наёмных программистов. Если для того, чтобы обыграть чемпиона мира, потребовалось создать уникальный суперкомпьютер, то сегодня в компьютерных шахматах осталось место только для гигантских корпораций, способных «задавить» проблему исключительно финансами и человеческим мясом, бросаемым на амбразуру шахматного программирования. Поэтому появление новых

технологий в этой сфере грозит массовыми увольнениями и всеобщим потрясением основ[807]. В действительности, за редким исключением, шахматные программы сегодня — результаты усилий одиночек, для которых их детища являются обычно хобби-проектами. На вершинах рейтингов шахматных программ красуются программы с открытым исходным кодом, такие как Stockfish (и его модификации) и Leela Chess Zero, создаваемые усилиями энтузиастов. Deep Blue вырос из аспирантского проекта Сюя Deep Thought, весь бюджет которого составил 5000 долларов (не считая расходов на производство шахматного чипа, оплаченных за счёт средств образовательной программы)[808]. Да, IBM позволила себе на несколько лет выделить под шахматный проект несколько специалистов и даже нанять несколько шахматных профессионалов в помощь команде, но даже здесь речь не шла об огромном коллективе. Развитие технологий, позволяющих частично заменить человеческую экспертизу моделями, являющимися продуктами машинного обучения, приводит не к уменьшению, а скорее к увеличению количества людей, вовлечённых в шахматное программирование, так как с появлением новых моделей возрастает интерес к испытанию их возможностей.

Ещё одно связанное с мифом о «полнопереборных» программах заблуждение заключается в том, что весь прогресс, достигнутый в шахматном программировании за последние годы, являет собой результат роста вычислительной мощности компьютеров. Получается, если игра программ неизменно основана на полном переборе, то единственный способ её усилить — это ускорить этот перебор, задействовав более современное оборудование. Сила игры современных программ действительно хорошо коррелирует с ростом вычислительной мощности машин, однако наличие корреляции не говорит о наличии связи. Точно так же сила игры шахматных программ неплохо коррелирует с ростом числа фотографий котиков, накопленных человечеством, но из этого вовсе не следует, что программы становятся сильнее под влиянием всевозрастающего объёма милоты и няшности. Чтобы опровергнуть это заблуждение, достаточно сравнить силу игры старых и новых шахматных программ на одном и том же оборудовании. Deep Fritz 10, выигравший в 2006 г. матч у Владимира Крамника, на сайте CCRL сегодня имеет рейтинг 2829 пунктов Эло, лидер же рейтинга движок Stockfish 14 — 3543 пункта[809]. Разница в 714 пунктов означает, что в матче из пятидесяти партий между этими двумя программами на одинаковом оборудовании Fritz будет в среднем проигрывать со счётом 49 : 1. Весь этот прогресс был достигнут целиком и полностью за счёт совершенствования алгоритмов, лежащих в основе шахматных программ. Если же говорить об оборудовании, современным средним персональным компьютерам ещё далеко до скорости перебора, продемонстрированной Deep Blue в 1997 г. (например, компьютер, оснащённый процессором Intel i9–10885H с тактовой частотой 2,4 ГГц и 16 логическими ядрами, позволяет классической версии Stockfish просматривать в середине игры около 10 млн позиций в секунду, что всё ещё в десятки раз меньше, чем соответствующий показатель Deep Blue).

Забавно, что многие люди, будучи загипнотизированными магией миллионов позиций в секунду, просматриваемых программами, упускают из виду тот факт, что анализ шахматной позиции человеческим мозгом — это процесс, вовлекающий огромное количество не осознаваемых до конца человеком вычислений, производимых этим уникальным «биологическим компьютером». Люди действительно умеют эффективно оценивать шахматные позиции и обходиться изучением небольшого поддерева игры, но это достигается за счёт скоординированной работы гигантского ансамбля нервных клеток. Давайте попробуем примерно оценить возможности «биологической машины», заключённой в черепной коробке. Действительно ли «грубая сила» [brute force] сегодня на стороне наших рукотворных систем?

Среднестатистический человеческий мозг состоит из примерно 86 млрд нервных клеток — нейронов[810]. Соединения нейронов называются синапсами, их количество в человеческом мозге меняется в течение жизни человека и в пике составляет порядка одного квадриллиона(10^{15})[811, 812]. Каждый синапс представляет собой сложный электрохимический механизм, который может содержать порядка тысячи переключателей молекулярного размера[813]. В месте контакта между нейронами содержится крошечный зазор, который называют синаптической щелью. В этот зазор могут проникать молекулы веществ, называемых нейромедиаторами. В зависимости от набора молекул, оказавшихся в синаптической щели, меняются параметры передачи электрических сигналов между нейронами. Вообще говоря, для достаточно точного моделирования массива из 30 000 синапсов сегодня требуется от 30 до 400 Мб памяти, что даёт нам оценку примерно от 8400 до 112 000 битов на синапс[814], но мы возьмём консервативную оценку в тысячу транзисторов на синапс. К сожалению, мы не знаем, с какой точностью нужно моделировать синапсы нейронов, чтобы построенная из таких нейронов сеть смогла эффективно воспроизводить наблюдаемые у людей психические феномены. Как метко выразился ещё Тьюринг: *«Нас не интересует, что мозг имеет консистенцию холодной каши»*, то есть нас интересуют не свойства субстрата, а вычислительные возможности биологической «машины». Последними экспериментами установлено, что для достижения 99% точности при моделировании поведения биологического нейрона на миллисекундном масштабе необходимо около тысячи искусственных нейронов, и хотя обычно реализация одного синапса искусственного нейрона требует более чем одного транзистора, мы можем хотя бы приблизительно оценить «производительность» отдельного биологического синапса[815, 816, 817]. Умножив квадриллион синапсов на тысячу транзисторов, получим «транзисторный эквивалент» мозга, равный одному квинтиллиону (10^{18}) условных транзисторов.

Ни одна созданная до настоящего времени интегральная микросхема не может похвастаться таким количеством транзисторов. Действующий рекорд среди серийных микропроцессоров принадлежит GPU (graphics processing unit, графический процессор, в просторечии «видеокарта») от Nvidia под

названием H100 — он содержит 80 млрд транзисторов[818] ($8{,}00 \times 10^{10}$) *, самая большая серийная программируемая вентильная матрица (FPGA) — Xilinx Virtex UltraScale+ VU19P — состоит из 32 млрд транзисторов[819] ($3{,}2 \times 10^{10}$).

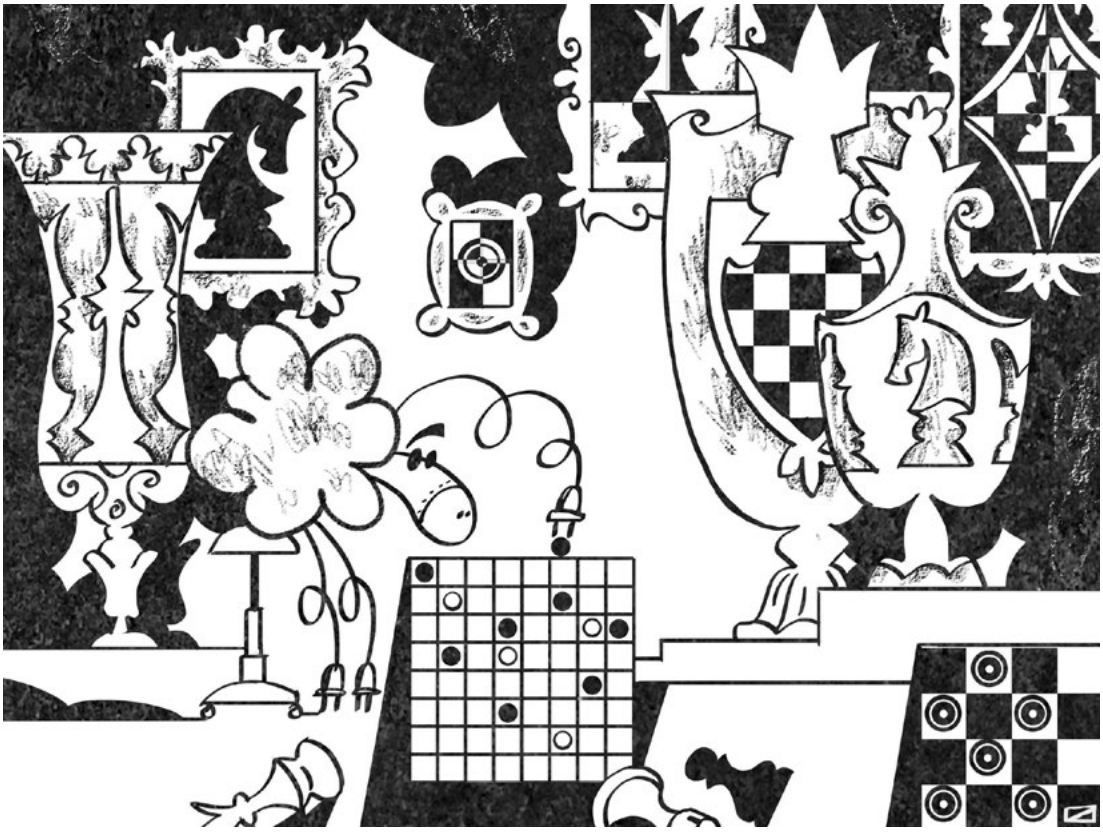
Впрочем, электроника имеет серьёзное преимущество в скорости. Продолжительность нервных импульсов в мозге составляет примерно 1–2 мс[820], и данные современной нейрофизиологии не позволяют нам утверждать, что рабочая частота мозга может превышать порог в 1 кГц, в то время как электронике доступны частоты, приближающиеся к 9 ГГц. Впрочем, самый «шустрый» процессор AMD FX-8150, работающий на частоте 8,81 ГГц, содержит всего 1,2 млрд транзисторов, в то время как частота H100 составляет скромные 1590 МГц по умолчанию и 1,98 ГГц при разгоне. Вентильная матрица Virtex UltraScale+ VU19P и вовсе предназначена для работы на частоте около 900 МГц (если исходить из величины Maximum frequency of a global clock tree ** в документации[821]). Перемножив частоту каждого устройства на количество транзисторов, получим теоретический предел производительности в битах в секунду. Для мозга он, по нашим подсчётам, составляет порядка 10^{21} бит/с, а для микропроцессоров — не более $1{,}58 \times 10^{20}$ бит/с. Таким образом, даже при крайне консервативной оценке вычислительной мощности отдельного синапса мы видим, что мозг превосходит микропроцессоры по своей «брутто-производительности» примерно на один десятичный порядок.

Конечно, сравнение это является сугубо приблизительным и основано на ряде серьёзных допущений. И всё-таки оно даёт представление о «грубой силе» человеческого мозга. Ещё более печальным для электроники сравнение становится после оценки энергоэффективности вычислений. Мозг, несмотря на свою фантастическую производительность, потребляет всего около 20 Вт, в то время как энергопотребление самых быстрых процессоров доходит до 400 Вт.

В этом месте читатель может воскликнуть: «Где же мои деньги?!» В смысле: почему же я не могу мгновенно перемножать в уме тридцатизначные числа и вытворять другие фокусы, которые так легко даются компьютерам? Ответ довольно прост: мозг не слишком приспособлен для того, чтобы выполнять сознательное умножение чисел; выполняя такую задачу, мы используем возможности нашей «аппаратной платформы» крайне неэффективно. В то же время, выполняя, скажем, задачу распознавания лица человека, мозг за доли секунды производит сложную обработку сигналов, поступающих от зрительных рецепторов. Математическим эквивалентом этой операции являются сложение и умножение больших наборов числовых коэффициентов, и мозг успешно справляется с этой задачей бессознательно, втайне от нас самих.

* Скорее всего, этот показатель будет немного улучшен с выходом GPU семейства Hopper-Next от Nvidia в 2024 году.

** Максимальная частота глобального иерархического дерева тактовых импульсов; сеть распределения тактовых импульсов (или дерево тактовых импульсов, когда эта сеть формирует дерево) — часть электрической схемы, которая распределяет сигнал(ы) тактовых импульсов (т. е. импульсов, предназначенных для синхронизации различных процессов в схеме) от общего источника до всех элементов, которые в них нуждаются.



Го — новая цель 3.7

Заниматься игрой в го является намного лучшим делом, чем предаваться целый день праздности и угощению рисом.

Конфуций. *Суждения и беседы*

Го — игра, которая на протяжении многих лет исполняла роль своеобразного философского камня в области искусственного интеллекта. Число возможных позиций в го (при размере доски 19×19) составляет[822] порядка 2×10^{170}, а число различных партий оценивается[823] и вовсе в циклопическое число 10^{360}. Если в среднестатистической шахматной позиции возможно 35 потенциальных ходов, то в го это число — 250, то есть больше почти на порядок. Таким образом, кремниевый блок для хранения сильного решения игры го, созданный по технологии, рассмотренной в прошлой главе, был бы примерно в 3×10^{91} раза тяжелее, чем всё обычное вещество нашей Вселенной, так что от затеи по строительству подобного устройства, по всей видимости, придётся отказаться.

Совершенно очевидно, что переборные алгоритмы для игры в го должны обладать чрезвычайной селективностью, то есть рассматривать лишь очень малое подмножество возможных альтернатив. Попытка создания моделей, обладающих подобной разборчивостью, долгое время оборачивалась неизменным фиаско. Если в шахматах оценка позиции на основе формализованных людьми правил позволила худо-бедно оценивать позиции с достаточным качеством, чтобы быстрый перебор компенсировал недостатки подобной оценки, то в го оценка была куда хуже формализуемой, а перебор куда более беспомощным в силу быстрого ветвления игрового дерева. Действительно, для оценки позиции в го довольно трудно придумать точные правила, задача оценки позиции в го похожа на задачу распознавания образов, а для этой задачи на протяжении многих лет также не было удовлетворительного решения.

В 1965 г. британский математик, коллега Тьюринга по Блетчли-парку Ай Джей Гуд писал: *«Го на компьютере? — Чтобы запрограммировать компьютер для разумной игры в го, а не просто для игры в соответствии с правилами, необходимо формализовать стратегические принципы игры или разработать самообучающуюся программу. [Стратегические] принципы [го]*

более качественны и загадочны, чем в шахматах, и более субъективны. Поэтому я думаю, что будет гораздо сложнее запрограммировать компьютер для игры в го, чем в шахматы»[824].

До 2015 г. программы играли в го в лучшем случае на любительском уровне. В варианте игры на доске 9 × 9 машины демонстрировали более впечатляющие результаты, некоторым программам удалось выиграть на маленькой доске некоторое количество игр против профессиональных игроков[825]. Находились исследователи, которые утверждали, что компьютеры никогда не смогут победить сильнейших игроков в го[826].

Первая программа для игры в го была написана Альбертом Зобристом в 1968 г. как часть диссертации, посвящённой распознаванию образов. Зобрист ввёл функцию влияния для оценки территории и использовал хеш-функцию, названную позже его именем, для обнаружения «ко» (правило ко — одно из правил игры го, согласно которому запрещено делать ход, если он приводит к повторению позиции, существовавшей на доске за один ход до этого; в различных вариантах правил го точная формулировка и интерпретация правила ко может различаться). Кстати говоря, хеш-функция Зобриста и по сей день используется в шахматных программах для создания хеш-таблиц перестановок/опровержений, быстрого поиска повторения позиции, поиска позиции в дебютной библиотеке и многих других задач.

В апреле 1981 г. Джонатан Миллен опубликовал[827] в журнале *Byte* статью, посвящённую Wally, программе для игры в го на доске 15 × 15, которая помещалась в один килобайт оперативной памяти микрокомпьютера KIM-1. В ноябре 1984 г. Брюс Уэбстер опубликовал[828] листинг собственной программы для игры в го на языке MacFORTH для компьютера Apple Macintosh.

Первым оставившим след в истории турниром по компьютерному го стал Acornsoft Computer Go Tournament, прошедший в Лондоне в марте 1984 г. при участии Британской ассоциации го (British Go Association). Все программы-участники использовали популярные микрокомпьютеры BBC Micro и вариант игры с доской 13 × 13. Победителем стала программа, созданная Брониславом Пшибылой[829, 830]. Сегодня она известна под названием Acornsoft Go и доступна для игры в онлайн-эмуляторе BBC Micro[831].

К 1980-м гг. также относится первое появление программ для игры в го в турнирах людей. По всей видимости, первым таким случаем стало участие программы Nemesis в турнирах Массачусетского клуба по го.

В 1987 г. тайваньский фонд Ing Foundation спонсировал первый из серии ежегодных турниров по компьютерному го. Победитель каждого из турниров играл партии с форой против «инсэев» (стремящихся стать профессионалами игроков в го, чей уровень игры в среднем соответствует шестому любительскому дану) и, в зависимости от результатов, мог претендовать на дополнительные призы. Размер приза зависел от размера форы, необходимой программе для победы над инсэем. Максимальный приз соответствовал победе без форы и составлял 40 млн тайваньских долларов (более миллиона долларов США). Он так никому и не достался, и спонсорство со стороны Ing

Foundation прекратилось после турнира 2001 г., когда были выиграны призы за фору в 11 камней и более[832].

В 1998 г. сильнейшие игроки побеждали компьютерные программы, предоставляя им огромные форы в 25–30 камней. В ходе чемпионата мира по компьютерному го в 1994 г. программа-победитель Go Intellect проиграла все три игры против игроков-юниоров, имея фору в 15 камней[833]. Игроки, понимавшие и использовавшие специфические слабые места программ, могли выигрывать с гораздо большими форами, чем их менее искушённые коллеги.

Развитие методов Монте-Карло для перебора вариантов в игровых деревьях в комбинации с прогрессом в области машинного обучения привело к тому, что лучшие программы достигли высокого уровня на маленькой доске, а в конце нулевых годов появились первые программы, способные достигать и удерживать ранги низкого уровня на сервере KGS Go (популярный онлайн-сервис для игры в го) для доски 19 × 19[834].

В 2010 г. на Европейском конгрессе по го в Финляндии программа MogoTW смогла, имея фору в семь камней, обыграть (с разницей всего в полтора очка) Каталина Цэрану, игрока пятого профессионального дана (высший дан — девятый, существует также понятие «десятый дан» (дзюдан), но это уже не ранг, указывающий на мастерство игрока, а один из титулов), первого европейца, получившего в го профессиональный дан[835].

В 2011 г. программа Zen, игравшая на 26-ядерном компьютере, достигла уровня пятого, а немногим позже и шестого любительского дана на сервере KGS Go, играя при временно́м ограничении 15 секунд за ход[836].

Теоретически первый профессиональный дан означает, что его обладатель играет сильнее любого любителя, в том числе обладателя седьмого любительского дана (восьмой любительский дан является скорее почётным званием, выдаваемым за особые заслуги перед федерацией го). На деле же бывают и исключения, поскольку для получения профессионального дана необходимо соблюсти немало требований, в том числе сдать специальный экзамен, поэтому обладатель седьмого любительского дана иногда может играть в го на профессиональном уровне, но шестой любительский дан всё-таки далёк от этого.

В 2012 г. Zen победила обладателя необычного (так называемого космического) стиля игры в го Масаки Такемию (девятый дан) на 11 очков при форе в пять камней и на 20 очков при форе в четыре камня[837].

В 2013 г. программа Crazy Stone, имея фору в четыре камня, одержала победу над Йосио Исиду по прозвищу Компьютер[838] (девятый дан)[839].

В 2014 г. состоялся матч без форы Codecentric Go Challenge между Францем-Йозефом Дикхутом (6-й любительский дан) и Crazy Stone. Игра велась на доске 19 × 19 до трёх побед. Дикхут одержал победу, хотя и уступил в первой партии на полтора очка[840]. Ни один из более сильных игроков в го не соглашался до этого играть матч на равных условиях.

В общем и целом успехи программ по игре в го несколько лет назад были весьма невелики. Спустя почти два десятилетия с момента победы над

 чемпионом мира по шахматам машины, казалось, были всё ещё безнадёжно далеки от чемпионского титула в го. Это заставляло критиканов, вечно принижающих прогресс в области искусственного интеллекта, злорадно потирать руки и отпускать едкие комментарии.

Кто бы мог подумать, что ситуация изменится в одночасье? О дальнейших событиях в мире го мы поговорим в одной из следующих глав.

Итоги и перспективы 3.8

> Так как всякое настоящее состояние простой субстанции, естественно, есть следствие её предыдущего состояния, то настоящее её чревато будущим.
>
> Готфрид фон Лейбниц. *Монадология*

Как описано в предыдущих главах, к началу 2010-х компьютерные программы доминировали практически во всех настольных играх: некоторые из них вообще оказались решены (например, шашки), для других решения были получены для некоторого, порой весьма внушительного, подмножества позиций, и даже в шахматах, которые часто назывались самой интеллектуальной игрой, достижения компьютерных программ не вызывали сомнений. Однако в то же время существовали игры, успех машин в которых был весьма скромным, — к ним, помимо го, относились, например, покер, бридж, игра аримаа (arimaa), созданная американским программистом индийского происхождения Амаром Саедом в качестве сложной для компьютеров игры[841].

Традиционные настольные и карточные игры по размеру поискового пространства в большинстве случаев существенно уступают стратегическим компьютерным играм, таким, например, как Civilization, Heroes of Might and Magic, не говоря уже о StarCraft или Dota. И в то же время стратегические компьютерные игры по этому показателю во много раз проще, чем ряд задач, возникающих перед интеллектуальным агентом в реальном мире. Если в арсенале методов искусственного интеллекта не было методов, позволяющих создавать ботов, способных обыгрывать человека в стратегические игры, значит, об успехах в решении стратегических задач в реальном мире можно было только мечтать. Чтобы сделать противостояние компьютерным противникам в играх более сложным, программисты нередко допускали некоторое жульничество — на сверхсложных уровнях в карточных играх компьютерные игроки могли заглядывать в карты противника (например, партнёр «Рентген» в программе «Марьяж» для игры в преферанс[842]), выполнять действия быстрее или с меньшей ценой (например, в Civilization компьютерные противники на высоких уровнях быстрее совершают открытия и выполняют улучшения[843]) и, наконец, просто управлять всеми персонажами (юнитами) одновременно и «видеть» всю игровую карту целиком. В реальном мире, однако, большая часть из подобных трюков невозможна, поэтому нужно искать другие решения.

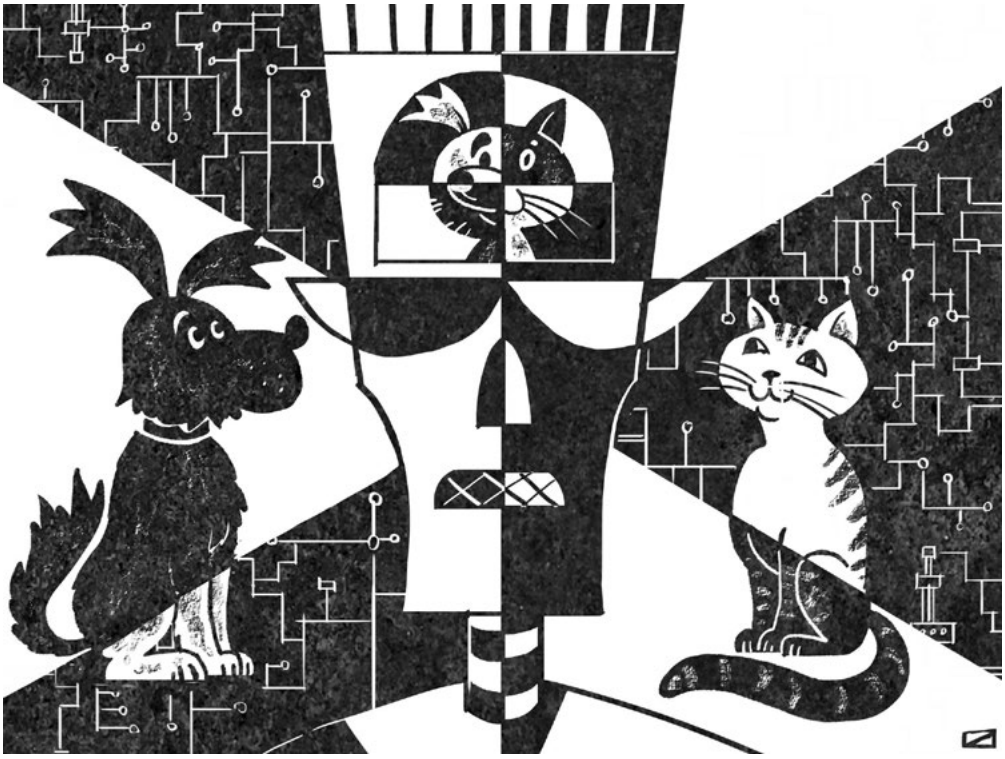
Попробуем разобраться в причинах, по которым для одних игр удалось быстро найти методы, позволяющие машинам играть достаточно сильно, в то время как в других они надолго задержались в статусе новичков. Например, очень часто в качестве причины того, что успехи машин в го гораздо скромнее, чем в шахматах, приводилось сравнение количества позиций и возможных партий в шахматах и го. Многих удовлетворяло это объяснение, поскольку чудовищные числа 10^{170} или 10^{360} буквально гипнотизировали людей и подавляли их волю к критическому мышлению. Между тем довольно очевидно, что размер поискового пространства игры не зависит от того, кто в неё играет — человек или компьютер. Кроме того, несмотря на то что успехи машин в играх были тем скромнее, чем больше было поисковое пространство этих игр, это правило всё-таки имело некоторые исключения. Например, в игре «отелло» (её также иногда называют «реверси») программы достигли уровня игры лучших людей-игроков на границе 1970–1980-х гг.: в 1980 г. программа Moor, созданная Майком Ривом, Майклом Стином и Дэвидом Леви, смогла выиграть одну из шести партий в матче с чемпионом мира Хироси Иноуэ[844]. Количество возможных позиций в «отелло» составляет[845] порядка 10^{28}, а игр — 10^{50}. Аналогичные показатели для английских шашек гораздо скромнее — 10^{20} и 10^{31}, однако Шефферу удалось достичь подобного успеха только в 1990-е гг. В нарды — с их огромным количеством[846] позиций (10^{20}) и игр (10^{144}) — программа Берлинера выиграла у чемпиона мира в 1979 г.

В шахматном программировании прогресс на протяжении многих лет был связан с совершенствованием методов оценки позиции и алгоритмов, определяющих приоритетность рассмотрения тех или иных вариантов в игровом дереве. В основе этих методов и алгоритмов были эвристические правила. Задача оценки существенно упрощается, если эту оценку можно разъять на несколько относительно независимых компонентов. Первые шахматные программы независимо оценивали материал, проходные пешки, мобильность и расположение фигур и так далее. Со временем в оценочных функциях увеличивалось количество нелинейных компонентов. Например, «цена» проходных пешек или оценки расположения фигур стали зависеть от фазы игры, со временем появились и нелинейные подходы к оценке материала — добавились компоненты, отвечающие за те или иные сочетания фигур. Усложнение оценочных функций стало возможно не только и не столько потому, что разработчики программ изобрели новые компоненты оценки, а скорее в силу того, что стали доступны масштабные вычислительные эксперименты для подбора значений растущего множества этих компонентов. В XXI в. благодаря дешевизне и доступности высокопроизводительных вычислительных машин стало возможным использование сотен тысяч и даже миллионов партий на сверхкоротких контролях времени для подстройки различных параметров шахматных эвристик. Для решения таких задач появились и общедоступные инструменты. Например, Реми Кулом, автор шахматной программы Crazy Bishop и программы для игры в го — Crazy Stone, создал утилиту CLOP (Confident Local OPtimization, уверенная локальная

оптимизация) для оптимизации параметров чёрного ящика в условии наличия шумов (Noisy Black-Box Parameter Optimization). Модифицируя различные параметры вашей программы по результатам множества тестовых игр, CLOP может подобрать значения этих параметров, позволяющие программе играть лучше[847].

Создатели движка Stockfish используют для экспериментов по улучшению своей программы распределённую платформу под названием Fishtest. В вычислительных экспериментах на этой платформе периодически задействовалось свыше 2000 машин с более чем 11 000 вычислительных ядер, что позволяло играть более 10 000 тестовых шахматных партий в минуту. Всего на платформе было осуществлено свыше 110 000 тестов, каждый из которых в среднем включал несколько десятков тысяч партий[848, 849]. Несмотря на столь внушительное количество тестов, оценочная функция классической версии Stockfish базируется на наборе признаков, изобретённых людьми, хотя «цена» каждого отдельного признака и подобрана в результате автоматизированного оптимизационного процесса. Нетрудно заметить, что успех подобной стратегии во многом зависит от того, насколько удачно было произведено разделение оценки на элементарные компоненты. Поэтому одним из важных барьеров на пути достижения машинами сверхчеловеческого уровня во многих играх стала неспособность людей качественно формализовать методы, применяемые ими при оценке позиции, удачно выделить компоненты этой оценки. По мере развития методов автоматизированной подстройки параметров игровых программ многие исследователи стали задумываться над тем, чтобы **автоматизировать также и задачу подбора самого множества параметров**. В конце концов, если люди регулярно допускают ошибки в оценке значений тех или иных параметров, то, быть может, они неправильно выбрали и сам их набор? Благодаря созданию программ, способных играть в некоторые игры на сверхчеловеческом уровне, стало ясно, что в ряде случаев цена экспертного человеческого знания не столь уж и велика, — вспомним хотя бы игру гроссмейстера Уолтера Брауна с программой Томпсона в окончании «ферзь против ладьи» или историю со «столетней позицией» Стёрджеса.

В общем, неудачи в деле создания программ, способных играть в игры с большим поисковым пространством на сверхчеловеческом уровне, по всей видимости, были связаны не с размером поискового пространства как таковым, а скорее с отсутствием методов, способных эффективно оценивать позицию в подобных играх, и неспособностью людей качественно формализовать собственные методы решения этой задачи. Поскольку в отношении второго ожидать существенного прогресса не приходилось, усилия исследователей были в основном направлены на решение первой проблемы. Практически любой человек может отличить на фотографии кошку от собаки, но никто не может в деталях описать алгоритм, который, получив на вход цвет каждого из пикселей цифрового фото, дал бы ответ на вопрос, что на ней изображено: собака или кошка.



Точно так же мастер го, умеющий с одного взгляда дать оценку позиции на доске, не в силах описать набор правил, лежащий в основе произведённой им оценки. Выходит, что человеческий мозг в процессе обучения способен создавать сложные методы анализа информации, хотя часто и не в состоянии их в полной мере осознать. Один из возможных путей решения возникших проблем заключался в том, чтобы выполнить своеобразный разбор на части, реверс-инжиниринг* этой способности мозга с целью последующего воспроизведения её в системах искусственного интеллекта. Об этом пути и о его плодах мы подробно поговорим в следующей части.

* Реверс-инжиниринг — так в технике и программировании называют исследование некоторого устройства или программы, а также сопроводительной документации в целях обнаружения недокументированных возможностей, изменения исходной системы или её воспроизводства без прямого копирования.

Нейронные сети и глубокое обучение

Замкнутый морем, сказал: «Пусть земли и воды преградой
Встали, зато небеса — свободны, по ним понесёмся!
Всем пусть владеет Минос, но воздухом он не владеет!»
Молвил — и всею душой предался́ незнакомому делу.
Новое нечто творит, подбирает он перья рядами,
С малых начав, чтоб за каждым пером шло другое, длиннее, —
Будто неровно росли: всё меньше и меньше длиною, —
Рядом подобным стоят стволы деревенской цевницы:
Ниткой средину у них, основания воском скрепляет.
Перья друг с другом связав, кривизны незаметной им придал
Так, чтобы были они как у птицы…

Овидий. *Метаморфозы*. Кн. VIII

Бионика и история изучения мышления 4.1

13 сентября 1960 г. в Дейтоне (штат Огайо, США) открылся первый симпозиум по бионике — прикладной науке, сфера деятельности которой находится на границе между биологией и техникой. Цель бионики — применение биологических методов или систем, найденных в природе, для изучения и разработки инженерных систем и новых технологий[850]. Девиз бионики: «Живые прототипы — ключ к новой технике», а на эмблеме изображены скальпель и паяльник, соединённые знаком интеграла.

Одним из отцов бионики и автором самого термина считается американский военный нейроанатом Джек Стил[851]. Стил был мастером на все руки: медик по образованию, с обширной областью медицинских интересов от физиологии до психиатрии и нейроанатомии, он разбирался также в инженерном деле и электротехнике, увлекался архитектурой, умел управлять самолётом и был остроумным рассказчиком. В рамках своей армейской исследовательской деятельности Стил работал над инженерными приложениями биологических моделей. Под впечатлением от работы Стила писатель-фантаст Мартин Кейдин создал роман «Киборг», по которому в начале 1970-х был снят сериал «Человек на шесть миллионов долларов» (The Six Million Dollar Man)[852].

Пионерские работы Стила способствовали оформлению и утверждению новой междисциплинарной науки, название которой, составленное из частей слов «биология» и «электроника»[853], Стил предложил в августе 1958 г.[854]

Впрочем, идея в некотором роде витала в воздухе, и Стил не был одинок в желании заимствовать принципы устройства биологических объектов для решения инженерных задач. В 1950-е гг. другой американский учёный, биофизик Отто Шмитт, предложил использовать термин «биомиметика» (biomimetics, от латинских слов *bios* — жизнь и *mimesis* — подражание). Поскольку в поп-культуре слово *bionic* обычно ассоциируется со сверхчеловеческими способностями, в англоязычной среде сегодня чаще используют вариант Шмитта, а иногда даже термин «биомимикрия» [biomimicry], который впервые появился в работах популяризатора науки Жанин Беньюс, посвятившей этому направлению целых шесть книг[855].

Термин «биомиметика» впервые появляется в словаре Мерриам — Уэбстера в 1974 г., где определяется как *«изучение строения, функций и способов формирования структур и веществ биологического происхождения (таких как ферменты или шёлк), а также биологических процессов и механизмов (например, синтеза белков или фотосинтеза) — главным образом для создания схожих продуктов искусственными методами, подобными природным»*[856].

Многократное «переизобретение» бионики, по всей видимости, было связано с тем, что это направление является для развития технологий весьма древней и органической частью — при отсутствии собственного эффективного решения технология часто пытается оттолкнуться от существующего в природе «рабочего прототипа». По мере роста могущества науки и техники мы замахиваемся на копирование принципов работы всё более и более сложных биологических объектов. Озаботившись идеей создания летательного аппарата, великий Леонардо да Винчи посвятил много времени изучению полёта птиц, о чём нам известно из его записей и чертежей, но, к сожалению, задача оказалась непосильной для технологий XV–XVI вв. Однако спустя четыре столетия французский изобретатель Клеман Адер, основываясь на данных Луи Пьера Мойяра о полёте птиц, а также на собственных исследованиях принципов полёта различных живых существ — от насекомых до летучих мышей, построил летательный аппарат «Эол» (Éole), ставший, по всей видимости, первым в истории самолётом, осуществившим взлёт за счёт тяги собственной силовой установки. Девятого октября 1890 г. оснащённый паровым двигателем «Эол», похожий на гигантскую летучую мышь, смог оторваться от земли и пролетел около 50 метров[857, 858, 859].

К плодам бионики XX в. относят обычно и застёжку-липучку, принцип действия которой позаимствован у репейника[860], и поверхности, копирующие структуру акульей кожи, позволяющие улучшить аэро- и гидродинамические характеристики изделий[861] и даже препятствующие размножению бактерий[862]. Изучение крыльев бабочек помогло в разработке технологии RFID-чипов[863], изучение лап гекконов[864] и клея устриц[865] — в создании медицинских адгезивов *. Гидрофобные структуры[866], наносенсоры[867], холестерические жидкие кристаллы[868] — перечислять заимствованные у природы идеи можно долго.

* Адгезив — вещество, способное соединять материалы путём поверхностного сцепления.

Конечно, наши самолёты не машут крыльями, и развитие технологий зачастую приводит к тому, что в промышленных образцах мы уже с трудом можем опознать их природные прототипы: особенности производственных процессов, а также эксплуатационные требования накладывают свои ограничения на выпускаемые продукты.

Часто бионика влияет на развитие техники не напрямую. Например, наличие в природе «рабочего прототипа» может быть свидетельством принципиальной возможности создания того или иного устройства: если птицы могут летать, значит, возможно создание летательного аппарата тяжелее воздуха; если растения способны синтезировать сахара и крахмал из углекислого газа и воды, значит, можно создать устройство, выполняющее ту же функцию.

Решения, существующие в природе, являются продуктом сложного оптимизационного процесса, известного под названием «эволюция». С одной стороны, масштабы и значительная продолжительность эволюции приводят к появлению биологических систем, хорошо приспособленных к тем условиям, в которых они действуют. С другой же — решения, найденные эволюцией, могут являться оптимальными лишь локально, то есть может возникнуть ситуация, когда дальнейшее «улучшение» системы возможно только за счёт временного её «ухудшения», что затруднено давлением естественного отбора. И наконец, эволюция оптимизирует устройство живых организмов в направлении их приспособленности к среде обитания, а вовсе не к задачам, которые человек пытается решать при помощи создаваемой техники. С точки зрения эволюции человеческий мозг должен потреблять мало энергии, должен быть устойчивым к физическим воздействиям (вряд ли вам понравится, если от падения яблока на голову вы будете полностью терять память), голова младенца должна беспрепятственно преодолевать родовые пути при рождении и так далее. Все эти ограничения будут только мешать, если мы стремимся создать устройство, единственная цель которого — достижение максимальной эффективности при решении интеллектуальных задач. Словом, у нас есть основания полагать, что мозг далёк от идеала думающей машины. В конце концов, его роль в организме заметно шире: мозг — это не только думающая, но и управляющая «машина», с важной задачей поддержания автоматических процессов в организме. Головной мозг вообще не является чем-то радикально обособленным от человеческого тела — например, около 500 млн связанных с ним нейронов входят в состав так называемой энтеральной нервной системы, состоящей из нервных сплетений в оболочках полых органов желудочно-кишечного тракта[869], а ещё около 200 млн нейронов находится в спинном мозге[870]. Впрочем, задачи, которые мозгу приходится решать в связи с его управляющей функцией, можно, по всей видимости, отнести к разряду интеллектуальных, хотя их решение часто происходит без сознательного контроля.

Так или иначе, на сегодняшний день человеческий мозг — это лучшая известная нам «машина» для решения неопределённо широкого спектра

интеллектуальных задач. Поэтому ещё с первой половины XX в. взоры учёных были обращены именно на этот «рабочий прототип», который позволяет нам оценить, какие именно задачи и какими средствами могут быть решены в принципе.

Вплоть до второй половины XIX в. наука немного знала о строении мозга. Учёные ограничивались самыми общими соображениями о природе мышления, выдвигая различные гипотезы о лежащих в его основе закономерностях и процессах. При этом внимание было сфокусировано в большей мере на принципах, составляющих основу умозаключений, а вопрос о физическом субстрате человеческого разума обходился стороной — в этой области царствовали либо наивные механистические гипотезы, либо откровенно магические по своей природе соображения о «тонкой материи», непознаваемой душе и так далее.

Логика Аристотеля, Мо-цзы, Акшапады Гаутамы, Нагарджуны и других интеллектуалов древности весьма преуспела в вопросах изучения структуры суждений, однако не все древние мыслители считали, что мышление является продуктом деятельности мозга. Тот же Аристотель приписывал эту роль сердцу. Появление в античной философии идеи о том, что именно мозг есть пристанище человеческого разума, традиционно приписывают Алкмеону Кротонскому, труды которого посвящены преимущественно медицинской тематике[871]. То, что было не до конца ясным для логиков, было вполне понятно врачам. По крайней мере, точку зрения Алкмеона вполне разделяли и «отец медицины» Гиппократ, и «отец анатомии» Герофил, и даже их коллега и по совместительству внук Аристотеля Эрасистрат[872]. Люди, чья работа заключалась в «ремонте» сложной машины под названием «человеческий организм», неизбежно лучше разбирались в особенностях его работы, чем философы. Аналогия между человеческим организмом и машиной стала особенно популярна в Новое время благодаря успехам в области механики. «Левиафан» Гоббса предваряет яркая метафора автора: *«…наблюдая, что жизнь есть лишь движение членов, начало которого находится в какой-нибудь основной внутренней части, разве не можем мы сказать, что все автоматы (механизмы, движущиеся при помощи пружин и колёс, как, например, часы) имеют искусственную жизнь? В самом деле, что такое сердце, как не пружина? Что такое нервы, как не такие же нити, а суставы — как не такие же колёса, сообщающие движение всему телу так, как этого хотел мастер?»* Столь же механически Гоббс определяет рассуждение [reason] как одну из способностей человеческого ума: *«рассуждение <…> есть не что иное, как подсчитывание (т. е. складывание и вычитание) связей общих имён с целью отметить и обозначить наши мысли»*[873]. Неслучайно в истории философии направление, к которому принято относить Гоббса, получило название «механической философии» или «механицизма». Позже Лейбниц в отзыве на работу Гоббса выражает её квинтэссенцию самым радикальным образом: *«Томас Гоббс, повсеместно глубоко исследующий основы, справедливо заметил, что всё, что делает наш ум, — это вычисление».* Философское наследие Лейбница

включает в себя обширные исследования в области теории мышления, благодаря чему этого немецкого мыслителя нередко называют «дедушкой искусственного интеллекта»[874].

Впрочем, как бы ни велики были успехи логики, математики, медицины и механики Нового времени, их возможностей было явно недостаточно, чтобы продвинуться в деле создания машин на основе принципов бионики для решения сложных интеллектуальных задач. Механические вычислительные устройства могли производить математические расчёты, оперировать с нехитрыми логическими суждениями, выполнять несложный статистический анализ, но сделать заметный шаг вперёд удалось только в эпоху электричества.

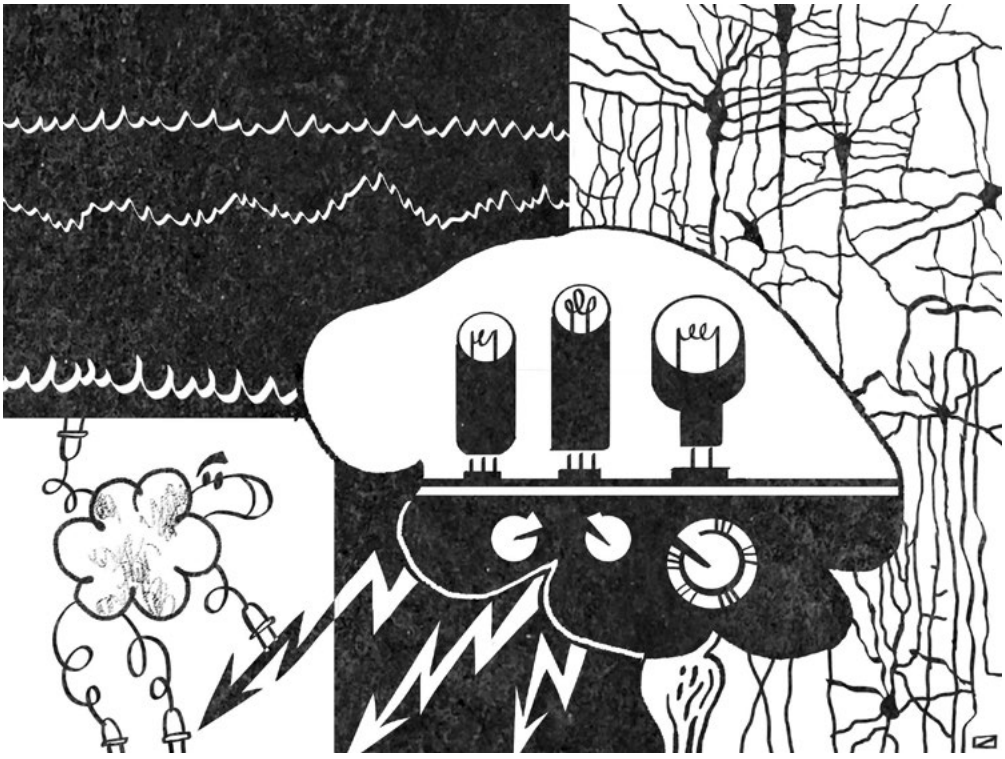
4.2 Лягушки, мыши, кальмары, люди и другие животные в цепких руках нейрофизиологов

К первой строке приступая, я Муз хоровод с Геликона
Сердце моё вдохновить умоляю на новую песню, —
С писчей доской на коленях её сочинил я недавно, —
Песню о брани безмерной, неистовом деле Арея.
Я умоляю, да чуткие уши всех смертных услышат,
Как, на лягушек напавши с воинственной доблестью, мыши
В подвигах уподоблялись землёю рождённым гигантам.

Война мышей и лягушек (Батрахомиомахия)

4.2.1 От экспериментов на животных до открытия нейронов

Представления о том, что активность мышц и нервов живых существ имеет электрическую природу, восходят к исследованиям Луиджи Гальвани, который опубликовал результаты своих опытов в 1791 г. Используя ручную динамо-машину, Гальвани пропускал слабые импульсы электрического тока через лягушачьи лапки и обнаружил, что ток заставляет мышцы сокращаться. Эти опыты дали начало исследованиям в области биоэлектрических явлений. Первое убедительное доказательство электрической природы нервных импульсов было получено в 1850-е гг. немецким физиологом Эмилем Дюбуа-Реймоном, которому удалось впервые в истории науки измерить электрические импульсы, бегущие по нервам к мышце (также для лягушки). В 1870-е гг. английский врач из Ливерпуля Ричард Катон обнаружил, что мозг генерирует электрический ток. Катон экспериментировал с отражающим гальванометром, состоящим из провода и катушки, которые вибрировали при обнаружении слабых токов. Прибор также имел небольшое зеркало, прикреплённое к катушкам, а яркая кислородно-водородная лампа направляла на зеркало узкий луч света, который затем, отражаясь, попадал на изображённую на стене затемнённой комнаты шкалу длиной около двух с половиной метров.



Чем сильнее был сигнал, тем выше поднимался по шкале световой луч. Катон прикасался электродами инструмента к мозгу во вскрытых черепах кроликов, кошек и обезьян[875] и обнаружил, что внешняя поверхность серого вещества заряжена более положительно, чем глубокие структуры мозга. Он также отметил, что электрические токи головного мозга, по-видимому, имеют отношение к основной функции: *«Когда какая-либо часть серого вещества находится в состоянии функциональной активности, сила электрического тока в нём обычно уменьшается»*[876].

Когда животное двигалось, жевало пищу или улавливало глазами свет, прибор регистрировал возрастание электрической активности. Мысли, заметил Катон, также порождали активность. Он подключил обезьяну к устройству и записывал ток, связанный с жеванием. *«Когда я показал обезьяне изюм, но не дал его, произошло небольшое уменьшение силы тока»*, — писал он[877].

Катону также иногда приписывают пионерскую работу в области «вызванных потенциалов» (т. е. электрических потенциалов в некоторой части нервной системы, возникающих вследствие воздействия стимула, такого как, например, вспышка света или звуковой сигнал). Впрочем, историки науки позже указывали, что гальванометр Катона вряд ли был способен регистрировать частоты свыше 6 Гц, что ставит под сомнение возможность регистрации Катоном вызванных потенциалов, наблюдаемых обычно на более высоких частотах.

Разница в полярности между поверхностью коры головного мозга и более глубокими областями, обнаруженная Катоном, может быть интерпретирована как открытие им «уровня постоянного потенциала» (steady potential, DC-potential; уровень постоянного потенциала — это слабый, медленно изменяющийся устойчивый потенциал между мозгом и референтными областями, один из сверхмедленных физиологических процессов, отражающий индивидуальные особенности энергозатрат, связанных с функциональным состоянием головного мозга и всей нервной системы)[878].

Также, практически случайно, Катон смог уловить слабый электрический ток и сквозь невскрытую черепную коробку: это стало первым опытом в области неинвазивной (т. е. не связанной с проникновением через естественные внешние барьеры организма) электроэнцефалографии[879].

Катон, исследования которого осуществлялись за счёт средств гранта Британской медицинской ассоциации, представил свои выводы 24 августа 1875 г., по результатам которых в Британском медицинском журнале появился короткий отчёт, состоявший из двадцати строк. Более подробное описание опытов было представлено в том же журнале в 1877 г. и содержало сведения об экспериментах на более чем сорока кроликах, кошках и обезьянах (в основном использовались кролики).

Катон получил определённое признание благодаря этой работе и в 1884 г. возглавил кафедру физиологии в Университетском колледже Ливерпуля (сейчас — Ливерпульский университет, University of Liverpool), затем стал там деканом медицинского факультета, а в 1907 г. — лорд-мэром Ливерпуля[880].

Работа Катона, впрочем, оставалась не замеченной научным сообществом в течение пятнадцати лет — научная коммуникация в конце XIX в. была довольно медленной.

В 1890 г. физиолог Адольф Бек из Ягеллонского университета в Кракове (Польша) обнаружил низковольтные высокочастотные колебания электрических потенциалов, возникающие между двумя электродами, помещёнными в затылочную кору мозга кролика. Не зная о более ранних работах Катона, Бек заявил, что стал первым, кто обнаружил электрическую активность мозга животных. Однако другой физиолог, Эрнст Флейшл фон Марксов из Венского университета, также описал электрическую активность мозга животных и оставил свои находки в запечатанном конверте в Венской имперской академии наук в 1883 г. (размещение запечатанного конверта, содержащего сведения о научных открытиях в ожидании их подтверждения, было обычной практикой европейского научного сообщества того времени). Очевидно, что фон Марксов также не знал о работе Катона. Когда статья Бека появилась[881] в немецком журнале *Zentralblatt für Physiologie* в 1890 г.[882], она привлекла внимание фон Марксова, который после вскрытия конверта заявил свои притязания. Бек и фон Марксов вступили в полемику по поводу приоритета открытия. Их спор разрешил Ричард Катон, указав на свою публикацию 1875 г.[883]

4.2.1

От экспериментов на животных до открытия нейронов

В 1870-е гг., когда физиологи обратили внимание на глобальную электрическую активность полушарий головного мозга, нейроанатомам удалось сделать серьёзный шаг вперёд в деле изучения структуры нервной ткани. За два года до экспериментов Катона, в 1873 г., был открыт метод Гольджи (сам автор называл его «чёрной реакцией»), позволяющий окрашивать отдельные нейроны (правда, слово «нейрон» до 1891 г. не употреблялось). До этого открытия Камилло Гольджи в биологии была популярна концепция, предложенная немецким гистологом Йозефом Герлахом, который считал, что волокна, выходящие из различных клеточных тел, соединены в единую сеть, получившую название «ретикулум» [reticulum]. Популярность идей Герлаха была связана с тем, что, в отличие от сердца или печени, мозг и нервную систему не получалось разделить на отдельные структурные единицы: хотя нервные клетки были описаны в составе ткани многими исследователями того времени, связь между нервными клетками и связывающими их аксонами и дендритами оставалась неясной. Главной причиной этого были недостатки микроскопии.

Благодаря своему открытию Гольджи увидел, что разветвлённые отростки одного клеточного тела не сливаются с другими. Он, однако, не стал отбрасывать концепцию Герлаха, предположив, что длинные тонкие отростки, вероятно, соединены в одну непрерывную сеть.

Четырнадцать лет спустя, в 1887 г., испанский нейроанатом Сантьяго Рамон-и-Кахаль узнал о «чёрной реакции» от психиатра Луиса Симарро, которому удалось улучшить оригинальную технику Гольджи. Рамон-и-Кахаль был удивлён тем, что лишь немногие исследователи используют этот замечательный способ исследования нервной системы. Ещё более усовершенствовав метод Гольджи, Рамон-и-Кахаль применил эту технику к различным типам нервной ткани животных и людей и выполнил подробные зарисовки того, что увидел под микроскопом.

Исследования испанского учёного показали, что, вопреки концепции Герлаха и предположению Гольджи, длинные тонкие отростки, выходящие из тел клеток, вовсе не связаны в единую сеть. Хотя многие волокна в образце ткани накладывались друг на друга, они оставались отдельными физическими структурами, подобно ветвям деревьев в лесной чаще. Нервная система, как и все другие живые ткани, состояла из отдельных элементов, как выразился сам Рамон-и-Кахаль — из «абсолютно автономных единиц».

В октябре 1889 г. Рамон-и-Кахаль посетил конгресс Немецкого анатомического общества в Берлине, чтобы представить свои открытия ведущим нейроанатомам. Хотя многие учёные издевались над Рамоном-и-Кахалем и его зарисовками, презентация учёного смогла убедить уважаемого швейцарского гистолога Рудольфа фон Кёлликера. В 1891 г. немецкий анатом Генрих Вильгельм Вальдейер объединил новаторское исследование Рамона-и-Кахаля с клеточной теорией и идеями швейцарского психиатра Огюста-Анри Фореля, а также с идеями швейцарского эмбриолога Вильгельма Гиса (именно он в 1889 г. предложил называть тонкие ветвящиеся отростки нервных клеток

дендритами, от греческого слова δένδρον — дерево). В итоге на свет появилось то, что сегодня носит название нейронной доктрины. Именно Вальдейер назвал нейронами клетки, из которых состоит нервная система. В 1896 г. фон Кёлликер ввёл термин «аксон» для обозначения длинных тонких отростков, передающих электрические сигналы от тела клетки (направление передачи сигналов, основываясь на своих наблюдениях, установил Рамон-и-Кахаль)[884].

В 1906 г. Рамон-и-Кахаль и Камилло Гольджи за труды по строению нервной системы получили Нобелевскую премию в области физиологии и медицины[885].

До наших дней дошло около трёх тысяч зарисовок Рамона-и-Кахаля[886], которые и сегодня остаются одними из самых подробных описаний структурного разнообразия мозга и нервной системы.

Рис. 75. Один из рисунков Рамона-и-Кахаля

История исследований электрической активности мозга 4.2.2

Впрочем, и до открытий Гольджи, Рамона-и-Кахаля и их коллег нейроанатомам было известно, что клетки серого вещества * связаны между собой нервными волокнами. Отталкиваясь от знания об электрической природе нервных импульсов, было весьма естественно предположить, что электрическая активность будет наблюдаться и в полушариях мозга. Однако в то время это предположение не удавалось подтвердить, потому что множество десинхронизированных потенциалов с разными полярностями производят очень слабый совокупный потенциал, который было трудно обнаружить доступными в то время измерительными устройствами. Несмотря на это, фон Марксову удалось показать, что периферическая стимуляция сенсорных органов способна вызывать небольшие колебания электрического потенциала в областях поверхности коры головного мозга, отвечающих за проекцию соответствующих чувств.

К сожалению, исследования фон Марксова были прерваны из-за его трагической смерти в 1891 г. В юности, работая в качестве ассистента известного патологоанатома Карла фон Рокитанского, фон Марксов в процессе препарирования трупа поранил большой палец правой руки. Заражение привело к ампутации пальца, и всю последующую жизнь фон Марксов страдал от хронических болей, которые утолял при помощи инъекций морфина и героина. Зигмунд Фрейд, близкий друг фон Марксова, в конце XIX в. изучал медицинские свойства кокаина и был убеждён, что кокаин может быть использован не только в качестве средства, вызывающего эйфорию, афродизиака и болеутоляющего средства, но также и для лечения морфинизма. Он порекомендовал его фон Марксову, который принял совет друга. Увы, кокаин лишь усугубил состояние учёного. Опустошённый болью, зависимостью и болезнью, он снова начал принимать морфин. В итоге здоровье фон Марксова не выдержало, и он скончался 22 октября 1891 г. в возрасте 45 лет[887, 888].

На мир нейробиологии сильно повлияло ещё одно открытие 1870-х гг. В совместном исследовании 1870 г. Густав Фрич и Эдуард Гитциг продемонстрировали возможность электрической стимуляции коры головного мозга. Фрича побудило к исследованиям необычное наблюдение: в ходе Австро-прусско-датской войны (в 1864 г.) он наблюдал сокращения мышц пациента во время перевязки открытой раны головного мозга[889]. Работы Фрича и Гитцига были продолжены Дэвидом Ферье и Джеральдом Йео в 1880 г., которые выполняли электрическую стимуляцию головного мозга обезьян, а также пациента во время операции по поводу опухоли головного мозга.

* Исторически анатомы подразделяли ткани мозга на серое вещество (лат. *substantia grisea*) и белое вещество (лат. *substantia alba*), руководствуясь цветом соответствующих тканей. Их цветовая дифференциация обусловлена белым цветом миелина и серым цветом кровеносных капилляров и клеточных тел.

Исследования электрической активности мозга на границе XIX и XX вв. активно велись и на территории Российской империи. Их начал Василий Данилевский — ему исполнилось всего 25 лет, когда он защитил написанную в Харьковском университете диссертацию, озаглавленную «Исследования по физиологии мозга». Эта работа была основана на электростимуляции, а также на изучении спонтанной электрической активности мозга животных[890].

Данилевский проводил исследования на мозге собак. Независимо от Катона он обнаружил изменения электрических потенциалов в мозге в ответ на воздействие звуковых раздражителей и при электрическом раздражении седалищного нерва. Данилевский также отмечал, что у собаки наблюдались *«самостоятельные или спонтанные токи мозга»*, хотя животному не предъявлялось никаких внешних раздражений. Слуховые стимулы вызывали отрицательное или положительное колебание в задних областях полушарий, а раздражение кожных нервов — в передних. Аналогичные реакции в коре мозга наступали и при раздражении ветвей блуждающего нерва током, а также если обонятельные рецепторы собаки подвергались воздействию различных запахов (аммиака, амилнитрита, жареного мяса).

Данилевский писал: *«Процессы возбуждения, возникающие в большом мозге под непосредственным влиянием внешних чувственных раздражений, сопровождаются характерными электродвигательными явлениями. Поэтому мы вправе признать, как наиболее вероятную, гипотезу, что физиологическая функциональная деятельность нервных мозговых (и других) клеточек также тесно связана с проявлением электрической реакции, как это уже признано для нервного волокна. Таким образом, изучение электрических явлений в головном мозге даёт возможность исследовать те объективные материальные процессы, которые представляют собой субстрат для субъективных психических явлений»*[891, 892].

После защиты диссертации Данилевский стажируется за границей — в лабораториях немецкого физиолога Карла Людвига и французского физика и физиолога Жака Арсена Д'Арсонваля, одного из основателей биофизики. В зрелом и позднем возрасте фокус исследований Данилевского смещается в сторону эндокринологии. По его инициативе в 1919 г. Харьковским медицинским обществом основано первое в советской республике учреждение эндокринологического профиля — Органотерапевтический институт. Четыре года спустя именно в этом учреждении было налажено первое в СССР производство инсулина[893, 894].

Эстафету Данилевского в области исследования электрической активности мозга подхватили три российских физиолога: Николай Введенский, Павел Ростовцев (при рождении Кауфман, во время Первой мировой войны ввиду антинемецких настроений сменил фамилию на Ростовцев) и Владимир Правдич-Неминский.

Николай Введенский, ученик Сеченова (создателя российской физиологической научной школы), в 1884 г. защитил магистерскую диссертацию по теме «Телефонические исследования над электрическими явлениями в мышечных

и нервных аппаратах». В этой работе рассматривается среди прочего использование телефона (как устройства, способного преобразовать электрические импульсы в звуковые колебания) для регистрации нервных импульсов в обнажённом мозге лягушек, кроликов и собак. Именно таким образом Введенскому удалось подтвердить результаты своего учителя, которые тот получил ранее, применяя гальванометр[895].

Ростовцев (Кауфман) выдвинул гипотезу, что эпилептический приступ должен быть связан с аномальными электрическими разрядами, и занялся изучением эффектов корковой электростимуляции.

Правдич-Неминский регистрировал электрическую активность мозга животных при помощи струнного гальванометра[896]. Его записи, выполненные в 1912 г. и опубликованные годом позже в журнале *Zentralblatt für Physiologie*[897], являются первыми в истории электроэнцефалограммами (сам учёный использовал термин «электроцереброграмма»), то есть графическими представлениями электрической активности головного мозга. Правдич-Неминский записывал сигналы из мозга, твёрдой мозговой оболочки и с поверхности черепа собаки, он описал ритм частотой от 12 до 14 колебаний в секунду в нормальных условиях и отметил его замедление при асфиксии.

ТЕЛЕФОНИЧЕСКІЯ ИЗСЛѢДОВАНІЯ

НАДЪ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЯВЛЕНІЯМИ

ВЪ МЫШЕЧНЫХЪ И НЕРВНЫХЪ АППАРАТАХЪ.

Николая Введенскаго.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
1884.

Рис. 76. Обложка книги Н. Е. Введенского

Потом Наполеон Цыбульский, который был учителем ранее упомянутого Адольфа Бека в Кракове и всемирно известным лидером в области общей физиологии, используя гальванометр с присоединённым к нему фотографическим устройством, получил электроэнцефалограмму собаки в момент эпилептического припадка, вызванного электростимуляцией. Приоритет же в получении первой человеческой электроэнцефалограммы принадлежит немецкому нейропсихиатру * Хансу Бергеру.

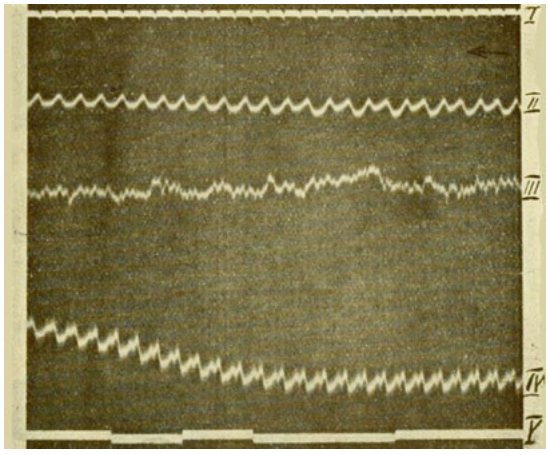


Рис. 77. Пример «электроцереброграммы» из работы Правдича-Неминского

Бергер не был ведущим специалистом ни в неврологии, ни в психиатрии. Без его новаторской работы в области электроэнцефалографии имя его, скорее всего, было бы забыто. Биографические

* В те годы неврология и психиатрия составляли одну специальность — нейропсихиатрию, чистая неврология в немецкоязычных странах только начинала становиться отдельной дисциплиной.

очерки изображают Бергера чрезвычайно дотошным и добросовестным человеком, несколько отстранённым при общении с пациентами, строгим руководителем отделения, трудолюбивым профессором, *anima candida* [чистой душой], не испытывавшей никакого интереса к факультетским интригам и распрям, почти никогда не посещавшим ежегодные собрания Немецкого психоневрологического общества. Электроэнцефалографическая работа Бергера велась в небольшой и очень примитивной лаборатории[898].

Начало исследованиям Бергера положил случай. Молодой Ханс изначально не собирался идти по стопам отца и становиться доктором. Получив аттестат зрелости в 1892 г., Бергер вначале поступил на математический факультет Берлинского университета, планируя стать астрономом. Однако юношу быстро постигло разочарование жизнью в большом городе. Чтобы сменить обстановку, Бергер принимает решение поступить на службу в кавалерию, предвкушая год катания на лошади на свежем воздухе.

Во время прохождения службы с Бергером приключился неприятный случай. Однажды во время учений его лошадь внезапно встала на дыбы, и Ханс, не удержавшись, упал на землю, оказавшись на пути упряжки лошадей, тащивших пушку. К счастью, в последний момент лошадей удалось остановить и Ханс смог избежать серьёзных травм. Через некоторое время Бергер впервые в жизни получил телеграмму от отца — старшей сестре Ханса приснился сон о том, что её любимый брат упал с лошади и сломал ногу, причём она

увидела этот сон примерно в то же время, когда с Бергером приключился злополучный инцидент!

Молодой офицер решил, что совпадение в данном случае невозможно и дело не могло обойтись без телепатии[899, 900].

4.2.2

История исследований электрической активности мозга

Уволившись с военной службы, Бергер начал изучать медицину. Желая найти естественно-научное объяснение произошедшему с ним случаю, Ханс мечтал открыть физиологические основы «психической энергии» и установить взаимосвязь между процессами в мозге и психикой человека[901].

Успешно окончив университет Йены (Герцогский Саксонский университет, Großherzogliche Herzoglich-Sächsische Gesamtuniversität, ныне — Йенский университет имени Фридриха Шиллера) в 1897 г., Бергер начал работу под руководством Отто Людвига Бинсвангера, который возглавлял кафедру психиатрии и неврологии в университете Йены и заведовал клиникой при университете. В 1901 г. Бергер стал приват-доцентом, в 1906-м — экстраординарным профессором, а в 1912-м — главным врачом клиники. Во время Первой мировой он служил военным нейропсихиатром, а после возвращения в Йену в 1919 г. в конце концов сменил ушедшего на пенсию Бинсвангера на посту главы кафедры[902].

В 1924 г. Бергер перешёл от опытов с животными к первым опытам над людьми. Будучи знаком с работами Катона, Бека, Правдича-Неминского и других своих предшественников, он предполагал, что электромагнитные волны, генерируемые человеческим мозгом, могут быть волнами телепатии. Поскольку в то время телепатия уже считалась оккультным предметом, эксперименты Бергера проводились в полуподпольных условиях в лаборатории, расположенной в небольшом здании на территории клиники.

На первом этапе исследований ввиду недостаточной чувствительности применяемой в те времена техники Бергер отдавал предпочтение пациентам с повреждениями черепа (их было несложно найти в достаточном количестве в послевоенной Германии). С 1902 по 1910 г. Бергер изучал электрическую активность головного мозга собак с помощью капиллярного электрометра Липпмана, но результаты исследований оказались неудовлетворительными.

Необходимо сказать несколько слов об оборудовании того времени, поскольку без этого будут не до конца понятны трудности, возникавшие в работе учёных. Капиллярный электрометр появился в 1875 г. после того, как Габриэль Липпман обнаружил, что капля ртути на кислоте изменяет свою форму при пропускании через неё даже очень слабого электрического тока. Другому исследователю, Этьен-Жюлю Маре, пришла в голову блестящая идея поместить небольшое количество кислоты и ртути в тонкую трубку. Пропуская через трубку луч яркого света, Маре смог регистрировать даже небольшие движения на поверхности ртути — и фиксировать их при помощи камеры. В 1876 г. Маре с гордостью объявил членам Парижской академии наук, что они с Липпманом смогли записать на плёнку сердцебиение лягушки и черепахи. Способность капиллярного электрометра регистрировать работу сердечной мышцы побудила других исследователей опробовать устройство

на нервных импульсах. В 1888 г. два выдающихся английских учёных Фрэнсис Готч и Виктор Горслей (Хорсли) продемонстрировали, что капиллярный электрометр может обнаруживать электрические изменения в периферических нервах и спинном мозге.

При помощи капиллярного электрометра Готч в 1899 г. обнаружил явление, получившее название «рефракторного периода». Он заметил, что нервные импульсы не могут следовать один за другим без паузы — между разрядами должен быть небольшой интервал времени. Несмотря на этот успех, чувствительности капиллярного электрометра явно не хватало для точного измерения величины и продолжительности нервного импульса, а также интервалов между последовательными импульсами. Искажения были связаны, в частности, с тем, что ртуть продолжала двигаться по инерции уже после прекращения действия раздражителя.

В начале XX в. у нейрофизиологов появился более чувствительный инструмент — струнный гальванометр. Это устройство было детищем Виллема Эйнтховена, заведующего кафедрой физиологии в Лейденском университете в Нидерландах. В основу прибора было положено следующее наблюдение: небольшой меняющийся ток может заставить очень тонкую проволоку («струну») вибрировать, если она находится в сильном магнитном поле. Изготовление первого струнного гальванометра заняло несколько лет и было завершено в 1901 г. Прибор весил несколько тонн, занимал целую комнату, а для электромагнита пришлось создать систему водяного охлаждения. Однако гальванометр работал достаточно точно, чтобы обеспечить потребности кардиологии того времени. Таким образом, Эйнтховен фактически стал основоположником электрокардиографии, а в 1924 г. за своё изобретение и открытия в области сердечных ритмов он был удостоен Нобелевской премии [903].

Теперь, имея перед мысленным взором картину техники, с которой приходилось работать нейрофизиологам в начале XX в., можно вернуться к деятельности Бергера. С 1910 г. он переключается на использование струнных гальванометров: сначала работает с конструкцией Эйнтховена, а затем с различными версиями гальванометра Эдельмана [904], в которых в целях повышения чувствительности прибора серебряные электроды вводились под кожу головы испытуемого [905].

6 июля 1924 г. небольшой струнный гальванометр Эдельмана показал колебания, предположительно исходящие от мозга, — так была получена первая электроэнцефалограмма * человека. Первые человеческие электроэнцефалограммы представляли собой записи активности мозга самого Бергера, его сына Клауса и пациентов с различными повреждениями черепа. В 1925 г. Бергер пришёл к выводу, что дефекты черепа необязательно являются преимуществом при

* Бергер отверг неудачный, по его мнению, термин «электроцереброграмма» из-за сочетания в нём греческого и латинских корней, предложив вместо него более логичный вариант «электроэнкефалограмма» (Elektrenkephalogram), в общем-то, фонетически более правильный, чем термин, принятый в итоге научным сообществом.

получении записи (из-за утолщения твёрдой мозговой оболочки, послеоперационных спаек и т. д.) и что записи могут быть сделаны столь же хорошо (или даже лучше) и без повреждения кожи головы[906].

С 1926 г. Бергер начинает использовать более мощный гальванометр Сименса с двойной катушкой (обладавший огромной по тем временам чувствительностью — 130 мкВ/см), что позволяет учёному окончательно отказаться от введения электродов под кожу и перейти к использованию электродов из серебряной фольги, прикреплённых к голове при помощи резинового бандажа[907].

В первом докладе Бергера 1929 г. продемонстрированы электроэнцефалограммы людей, выполненные как при помощи игольчатых электродов, так и неинвазивным методом. Записи были сделаны на фотобумаге и имели продолжительность от одной до трёх минут.

Рис. 78. Пример электроэнцефалограммы из доклада Бергера

Между 1926 и 1929 гг. Бергер получил хорошие записи альфа-волн *. Ранние данные часто были несовершенными, и в 1928 г. Бергер всё ещё сомневался в достоверности своих наблюдений. Первый отчёт 1929 г. показывает существование альфа-ритма и реакцию альфа-блокировки, а также описание меньших бета-волн. В отчёте Бергер указывает на недостатки работ предшественников и демонстрирует исключительную скрупулёзность в деле отсеивания посторонних источников сигнала[908, 909].

Более поздние отчёты Бергера, выходившие в 1930-е гг., содержали настоящие жемчужины: исследования флуктуаций сознания, первые электроэнцефалограммы, выполненные во время сна, исследование влияния гипоксии (кислородного голодания) на мозг человека, исследование различных мозговых расстройств и даже догадки о наличии пароксизмальных разрядов ** при эпилептических приступах.

* Сегодня их часто называют волнами или ритмом Бергера, хотя сам учёный из скромности возражал против этого названия.

** Пароксизмальный разряд — группа колебаний, резко отличных по структуре и амплитуде от фоновой активности; пароксизмальный разряд внезапно появляется, продолжается от долей секунды до нескольких секунд, а затем так же внезапно прекращается.

В конце 1930-х гг. у Бергера развивается серьёзная депрессия, которая приводит к самоубийству учёного 1 июня 1941 г. По мнению некоторых биографов Бергера, одной из причин этого — помимо затяжного заболевания, похожего по симптомам на грипп, — могло стать соперничество с группой учёных из Института исследований мозга в Берлине, которой руководил Алоис Корнмюллер. У последнего предположительно были связи в правительственных учреждениях в Берлине, и тревожный и мнительный Бергер боялся, что его открытия будут отобраны более агрессивными коллегами. Другие исследователи часто приводят в качестве главного источника депрессии Бергера его неважные отношения с нацистским режимом, указывая, например, в качестве довода перевод его на должность заслуженного профессора [Professor Emeritus] в 1938 г.[910] Однако последние исследования говорят о том, что отношения Бергера с нацистами, возможно, не были столь уж плохими[911, 912].

В своей книге «Душа» (Psyche), написанной за год до смерти, Бергер вновь обращается к проблеме экстрасенсорного восприятия, оценивая способность электроволновой модели объяснить этот феномен и приходя к неизбежному выводу о том, что электромагнитная экстрасенсорика вряд ли возможна. Электромагнитные волны, испускаемые мозгом, слишком слабы для того, чтобы преодолевать сколь-нибудь значимое расстояние по воздуху[913]. Таким образом, результатом многолетних исследований Бергера стало крушение его первоначальных надежд. Однако он, будучи добросовестным исследователем, не стал предаваться самообману. Подобно средневековым алхимикам, получившим ценные для науки результаты в попытках достичь иллюзорной цели, Бергер обогатил современную науку и медицину ценными знаниями и инструментами.

4.2.3 Первые математические модели нейрона — Хорвег, Вейс и Лапик

Итак, первые шаги в изучении электрической активности нервной системы были сделаны. Однако для того, чтобы приблизиться к возможности создания устройства, симулирующего работу мозга, нужно было идти дальше. И важной задачей, стоявшей перед исследователями, было изучение физических характеристик отдельных строительных кирпичиков мозга — нейронов и их отростков — аксонов и дендритов. Нервные волокна, пронизывающие тело человека и других животных, как раз и есть не что иное, как длинные отростки нейронов, покрытые глиальными оболочками.

Нейроглия, или просто глия (от др.-греч. γλία — клей), — это совокупность вспомогательных клеток нервной ткани, составляющих около 40% объёма центральной нервной системы. Глия состоит из различных типов клеток, выполняющих различные функции. Например, олигодендроциты формируют

оболочки, окружающие тела нейронов, и выполняют изолирующую и опорную функции. Эти оболочки и называют глиальными.

Ещё со времён Гальвани было известно, что нервы возбуждаются под воздействием электричества. Но каковы должны быть параметры этого воздействия? Как успех стимуляции нерва зависит от силы и продолжительности импульса электрического тока и какие биофизические процессы лежат в основе этой зависимости?

4.2.3

Первые математические модели нейрона — Хорвег, Вейс и Лапик

В 1840-е гг. этими вопросами задался отец-основатель электрофизиологии Эмиль Дюбуа-Реймон. Отталкиваясь от результатов экспериментов, он пришёл к выводу, что электрический ток оказывает возбуждающее действие на нерв или мышцу только при изменении его силы. Согласно теории Дюбуа-Реймона, постоянный ток способен возбуждать нерв только в начале и в конце своего импульса, а не в средней части импульса, когда сила тока не меняется. Если это так, то пороговая сила (т. е. минимальная сила тока, достаточная для возбуждения нерва) должна быть полностью независима от длительности импульса. Ни абсолютное значение силы тока, ни количество электричества, переносимого по нерву, не играют особой роли, важна только величина перепада в силе тока. Дюбуа-Реймон опубликовал свои выводы в работе под названием «Исследование животного электричества» (Untersuchungen über tierische Elektrizität)[914], увидевшей свет в 1848 г.

Авторитет Дюбуа-Реймона во второй половине XIX в. был столь велик, что даже в случаях, когда результаты опытов входили в явное противоречие с его теорией, получившей известность как «основной закон возбуждения», другие электрофизиологи предпочитали не подвергать её сомнению. В течение десятилетий исследователи прилагали все возможные усилия, чтобы согласовать с нею новые экспериментальные данные[915].

Например, немецкий физиолог Адольф Фик в ходе экспериментов обнаружил, что длительность импульса тока является важным фактором возбуждения. Фик писал, что при заданном уровне силы тока он должен поддерживаться в течение определённого времени, чтобы произвести эффект[916]. Он также заметил, что некоторые мышцы беспозвоночных остаются в состоянии устойчивого сокращения, пока поддерживается ток (без каких-либо изменений в его силе). Существование таких устойчивых реакций мышцы прямо противоречит фундаментальному закону Дюбуа-Реймона. Казалось бы, этих результатов было достаточно, чтобы подвергнуть общепринятую теорию пересмотру. Вместо этого Фик резюмирует: *«Принципиально новая формулировка закона мышечного возбуждения пока что не рассматривается»*. Примерно так же поступили Иоганн Крис[917] и Эдуард Пфлюгер[918].

Однако факты — упрямая вещь, и по мере накопления экспериментальных данных становилось всё труднее и труднее мириться с их несоответствием теории. Первым, кто открыто бросил вызов общепризнанной доктрине, стал учёный из Утрехта Ян Хорвег[919].

В своих многочисленных опытах Хорвег использовал для стимуляции нервов разряды лабораторных электрических конденсаторов Гефа с переключаемой

ёмкостью от 1 до 1000 нФ. Эксперименты проводились на теле человека. В статье не указывается, на какую именно часть тела накладывались электроды, но, по всей видимости, это была рука. Для зарядки конденсаторов применялась батарея, содержавшая сорок элементов Лекланше * напряжением 1,5 В, что позволяло получить напряжение от 1,5 до 60 В [920].

Обобщив экспериментальные данные, учёный пришёл к выводу, что пороговое напряжение, необходимое для стимуляции нерва (успех стимуляции определялся по минимальному подёргиванию мышцы), описывается следующей эмпирической зависимостью:

$$V = a\,R + \frac{b}{C},$$

где R — сопротивление электрической цепи, C — ёмкость конденсатора, а a и b — некоторые константы.

Следовательно, напряжение, необходимое для стимуляции нерва, возрастает по мере уменьшения ёмкости. Заряд, необходимый для стимуляции, $q = V \times C$, уменьшается с уменьшением C до конечного предельного значения b. Напротив, электрическая энергия $\frac{1}{2} CV^2$ достигает минимума при некоторой определённой величине ёмкости. Хорвег сделал следующий вывод: *«Возбуждение нерва не является следствием изменения силы тока di/dt...; процесс возбуждения является только функцией силы тока i(t)»*. Это заявление, по всей видимости, стало первой решительной критикой закона Дюбуа-Реймона.

В 1892 г. Хорвег опубликовал статью [921] со своими смелыми выводами в журнале *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere* (Архив Пфлюгера общей физиологии человека и животных).

Интересно, что подавляющее большинство физиологов во времена Хорвега не осознавало, что такое же по сути соотношение между ёмкостью и порогом возбуждения получил Алессандро Вольта ещё в 1803 г. Вольта ориентировался на ощущение покалывания, вызываемое электрическим током в его собственном пальце [922].

Необходимость радикального пересмотра общепринятых взглядов напугала научное сообщество, и многие известные учёные, такие, например, как Эдуард Пфлюгер, поспешили с порога отвергнуть [923] идею Хорвега, не слишком утруждая себя доказательствами. Прошло целых девять лет, пока в 1901 г. Жорж Вейс не установил [924] связь между электрическим зарядом, используемым для стимуляции, и её продолжительностью, продемонстрировав, что измерения Хорвега были правильными [925].

На основе экспериментальных данных Вейс предложил простую эмпирическую формулу, связывающую необходимые для стимуляции силу тока и продолжительность импульса:

* Элемент Лекланше — марганцево-цинковый элемент питания (источник тока), катод которого изготовлен из смеси графита с диоксидом марганца (MnO_2), анод — из металлического цинка, а в роли электролита выступает раствор хлорида аммония NH_4Cl.

$$i = \frac{a}{t} + b,$$

где i — сила тока, t — продолжительность импульса, a и b — некоторые константы[926].

4.2.3

Первые математические модели нейрона — Хорвег, Вейс и Лапик

В 1909 г. Луи Лапик переформулировал[927] результаты в знаменитую кривую силы — времени, носящую сегодня наименование кривой Хорвега — Вейса — Лапика и являющуюся одним из фундаментальных принципов нейронной стимуляции[928].

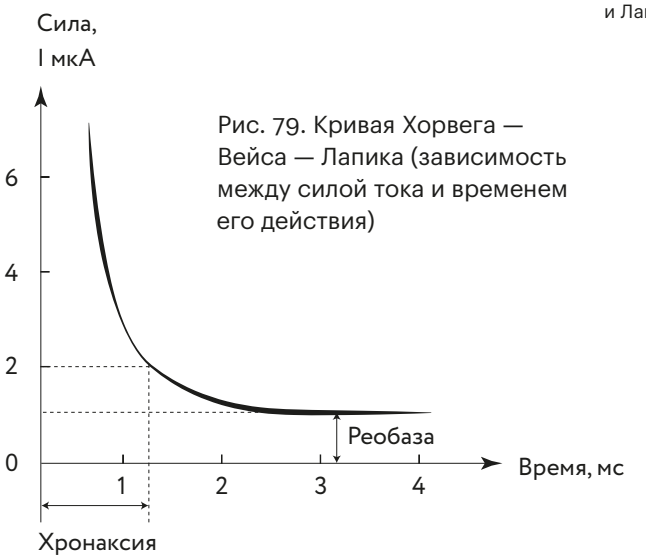


Рис. 79. Кривая Хорвега — Вейса — Лапика (зависимость между силой тока и временем его действия)

Исследования и жизнь Лапика заслуживают подробного обзора.

Он родился в городе Эпинале в 1866 г. Его отец был ветеринарным врачом и поощрял страсть сына к естествознанию. После окончания местного колледжа юноша поступил на факультет естественных наук Парижского университета, который окончил в 1886 г., а затем продолжил обучение на медицинском факультете. То, что Лапик проявлял активный интерес к физике и химии, в те дни было весьма необычно для медицинских кругов. Поэтому знаменитый врач Жермен Се поручил ему организовать небольшую химическую лабораторию в больнице «Божий приют» [Hôtel Dieu, Отель-Дьё], где Лапик занялся исследованием циркуляции железа в организме позвоночных. Результаты исследований были представлены в диссертации на соискание степени доктора наук, успешно защищённой в 1897 г.

Экспериментальная работа молодого учёного в области химии и физиологии осуществлялась с перерывами на другие исследования. Например, както вдова сахарного магната мадам Лебоди, недовольная разгульным образом жизни своего сына Макса, решила отправить его в научную экспедицию на яхте «Семирамида» (Semiramis) с группой увлечённых молодых учёных, которые могли бы вдохновить сына на изменение образа жизни[929]. Несмотря на то что её сын так и не захотел[930] взойти на борт яхты, экспедиция всё же состоялась, и в путешествии 1893 г. Лапик по поручению Министерства общественного образования занимался изучением различных групп коренного населения островов Индийского океана. Спустя несколько лет он осуществил и вторую миссию в Индию от имени того же министерства в целях изучения дравидийского населения юга[931].

Во времена печально известного дела Дрейфуса Лапик и его друзья становятся на сторону несправедливо осуждённого офицера и решительно выступают против шовинистических и антисемитских настроений в обществе[932, 933].

В 1899 г. Лапик стал доцентом в Сорбонне, а с 1902 г. занялся изучением физиологии нервной системы[934].

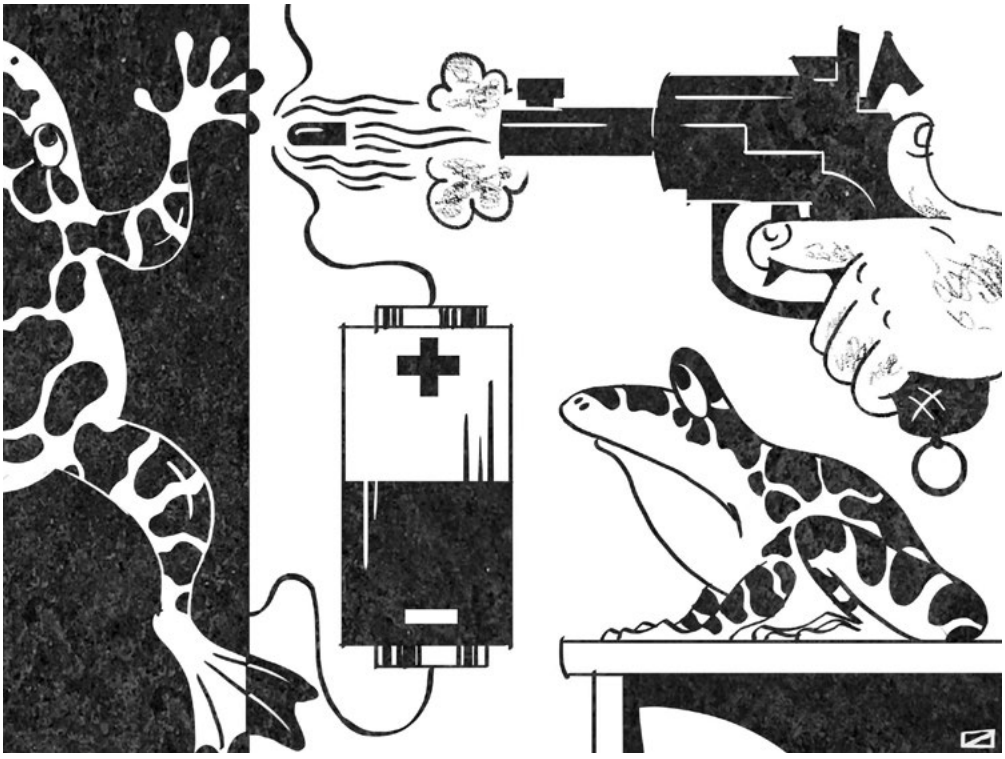
Лабораторные исследования в области электрофизиологии начала XX в. весьма поучительны — в отсутствие сложного технического арсенала, доступного современной науке, учёные были вынуждены полагаться на собственную инженерную смекалку.

В своём первом исследовании[935, 936] 1907 г. Лапик представляет модель нерва, построенную на простой конденсаторной схеме, которую он сравнивает с данными, полученными при стимуляции нерва лягушки.

Поскольку отдельные нейроны было трудно выделить, Лапик стимулировал нервные волокна внеклеточно. Обычно он использовал седалищный нерв лягушки, который возбуждает мышцы ног.

В качестве стимула Лапик использовал короткий электрический импульс, который подавался через два электрода, разработанных и изготовленных специально для этой цели. В идеале в экспериментах по стимуляции можно было бы использовать импульсы тока, но подходящие источники тока создать было непросто. Вместо этого Лапик использовал источник напряжения — батарею. Регулировка напряжения осуществлялась при помощи делителя напряжения, представлявшего собой длинный провод с ползунком, похожий на современный потенциометр. Кроме того, чтобы обеспечить практически неизменную силу тока во время стимуляции, Лапик поместил в цепь последовательно с электродом мощный резистор.

Получить точные импульсы длительностью всего несколько миллисекунд тоже было непросто, изобретённый несколько ранее инструмент для этого был назван реотомом (rheotome, буквально «резак для тока»). Существовало множество оригинальных конструкций реотомов, например использующих маятники или вращающиеся диски. Лапик, вслед за Вейсом, использовал более экзотический, а именно баллистический реотом. Это устройство состояло из пистолета с капсюльным замком, пуля которого сначала разрывала первую перемычку, создавая ток в стимулирующей цепи, затем разрывала на своём пути вторую перемычку, прерывая контакт (Лапик жаловался на неприятный запах от выстрела; Вейс был лишён этого неудобства, так как использовал пневматическую винтовку, приводимую в действие баллоном с жидкой углекислотой[937]). Изменяя расстояние между проводами, Лапик мог точно настраивать длительность импульса. Для каждого варианта его длительности учёный варьировал напряжение, чтобы определить величину, необходимую для достижения порога раздражения. Мы точно не знаем, как именно определялось достижение порога, но, по всей видимости, экспериментатор просто наблюдал, была ли стимуляция достаточной для того, чтобы заставить ногу лягушки двигаться.



Модель Лапика стала основой для будущих моделей клеточной мембраны нейрона.

Лапик начинает свою статью 1907 г. с утверждения, что нервные мембраны являются не чем иным, как поляризуемыми полупроницаемыми мембранами. Поляризуемые мембраны в первом приближении могут быть смоделированы при помощи конденсатора с утечкой. Лапик сравнивает полученные данные с предсказаниями модели, предложенной Вейсом, и показывает, что модель Вейса с постоянной (независимой от напряжения) утечкой предсказывает прямую линию на графике зависимости порога возбуждения от произведения напряжения на длительность импульса, в то время как расположение точек лучше описывается выпуклой кривой, соответствующей альтернативному уравнению, предложенному Лапиком.

Любопытно, что уравнение Лапика также не слишком точно описывает данные. Учёного это, однако, не смущает. Он пишет, что, разумеется, существует некоторая погрешность. Действительно, в этом нет ничего удивительного, учитывая, что нервный пучок стимулируется внеклеточно при помощи весьма примитивного оборудования.

Темой дальнейших исследований Лапика стала связь между параметрами мембраны и возбудимостью. В 1909 г. он вводит в оборот понятия «реобаза» и «хронаксия»: реобазой называют минимальную силу тока, вызывающую возбуждение мышечной либо нервной ткани при неограниченном времени

воздействия, а хронаксией — минимальное время, требуемое для возбуждения мышечной либо нервной ткани постоянным электрическим током силой удвоенной реобазы. В формуле Вейса константа b представляет собой реобазу, а отношение a / b соответствует хронаксии. Концепция хронаксии иногда используется и в наши дни при разработке кардио- и миостимуляторов[938].

Фактически хронаксия является выражением функциональной скорости исследуемой ткани: медленные мышцы и нервы характеризуются длинной хронаксией, а быстрые мышцы и нервы — короткой. Благодаря измерениям хронаксии удалось численно оценить эффекты разных воздействий на нервную систему (изменение температуры, приём различных лекарственных средств и т. п.), а измерение хронаксии двигательных нервов позволяет количественно оценивать развитие дегенеративных или регенеративных процессов в тканях, а также раскрыть особенности движения человеческого тела.

Работа 1907 г. привела Лапика к ряду теоретических рассуждений. Он постулировал, что активация цепочки нервных клеток зависит от последовательной электрической стимуляции каждой клетки импульсом (потенциалом действия *) предыдущей.

Лапик предложил теорию нервных процессов, которая напоминала подстройку или резонанс между колебательными радиоконтурами. Теория показывала, что передача возбуждения между двумя нервными клетками происходила наилучшим образом, когда клетки имели одну и ту же хронаксию. Когда вторая клетка имела более длинную хронаксию, её возбуждение требовало многократной активации первой. В этом случае числовые значения, полученные в соответствии с моделью Лапика, являются адекватными независимо от того, производится ли стимуляция электрически или химически (например, под воздействием нейромедиатора **, такого как ацетилхолин)[939].

Лапик считал хронаксию важной величиной, характеризующей физиологические свойства возбудимой ткани. Он собрал значения хронаксии, измеренные на различных тканях в разнообразных экспериментальных условиях. Лапик изучал блокирование передачи нервных импульсов при помощи яда кураре, рассматривая воздействие яда как изменение хронаксии мышцы. Теория французского учёного произвела большое впечатление на многих исследователей, которые пытались на её основе интерпретировать сложные явления в центральной нервной системе[940].

Появление новых методов и технологий, позволяющих регистрировать реакцию нервных клеток, позволило подтвердить некоторые предсказания

* Потенциалом действия называют волну возбуждения, перемещающуюся по мембране живой клетки в виде кратковременного изменения мембранного потенциала (т. е. разницы в электрическом потенциале между зарядами внутренней и внешней стороны мембраны) на небольшом участке нейрона или кардиомиоцита. Далее по тексту книги мы часто для простоты будем использовать термин «импульс», хотя среди нейрофизиологов принято использовать более строгий термин «потенциал действия».

** Нейромедиаторами называют биологически активные химические вещества, посредством которых осуществляется передача электрохимического импульса через синаптическое пространство между нейронами.

4.2.3

Первые математические модели нейрона — Хорвег, Вейс и Лапик

теории. Например, в 1913 г. Лапик и Рене Лежандр показали, что хронаксия моторных волокон, или аксонов, обратно пропорциональна их диаметру, что было продемонстрировано в катодно-лучевых осциллографических записях, полученных Эрлангером и Гассером в 1928 г.[941]

Но даже на пике популярности измерений хронаксии появилось несколько работ, поставивших важность таковых под сомнение. Американский физиолог Хэллоуэлл Дэвис, например, указал[942], что хронаксия мышцы, измеренная с помощью крупных электродов, намного больше, чем хронаксия, измеренная с помощью небольшого стимулирующего катода. В 1930-е гг. кембриджский физиолог Уильям Раштон показал[943] зависимость хронаксии от расположения электродов, используемых для стимуляции[944]. Причины этого стали понятны, когда исследователям удалось разобраться в роли, которую при передаче нервных импульсов играют оболочки нервных волокон, но об этих открытиях мы поговорим немного позже.

Стоит поговорить о незаурядной личности Лапика. Спектр физиологических проблем, интересовавших учёного, был весьма широк — физиология питания, термогенез, коэффициент цефализации, физиология морских водорослей, защита от отравляющих веществ, механизмы действия ядов. Лапик занимал престижные преподавательские должности: он был профессором общей физиологии в Музее естествознания с 1911 г. и в Сорбонне с 1919 по 1936 г.[945] В 1911 г. Лапик участвовал в создании Французского института антропологии — научного общества, объединяющего учёных из разных областей науки для обмена знаниями по антропологии.

Луи Лапик также являлся одним из участников «научной колонии» на мысе Аркуэст в Плубаланеке, также известной под названием «Сорбонна-Пляж». С 1900 г. группа интеллектуалов — включавшая среди прочих историка Шарля Сеньобоса, физиков Жана Перрена, Пьера Оже, Марию Склодовскую-Кюри, Пьера Кюри, Ирен и Фредерика Жолио-Кюри, а также математика Эмиля Бореля — во время совместного пляжного отдыха занималась обсуждением актуальных вопросов науки и общественной жизни. Будучи страстным республиканцем, Лапик, как и многие его близкие друзья, всю жизнь боролся против милитаризма, за секуляризм и социалистические идеи.

Лапик был отличным моряком. Каждое лето он выводил двадцатитонную яхту, носившую имя «Аксон» (Axone), в сложные воды у побережья Северной Бретани. Члены его лаборатории часто также присутствовали на борту, сочетая изучение физиологии с мореплаванием.

В 1943 г. увидела свет книга Лапика «Нервная машина» (La machine nerveuse)[946], подводящая итог многолетних исследований учёного и написанная им во время заключения в тюрьме гестапо (в октябре 1941 г. он вместе с Эмилем Борелем и двумя другими членами Французской академии наук был арестован по обвинению в ведении антинемецкой пропаганды среди студентов[947]). Этот факт из биографии учёного — примечательное дополнение к его портрету.

В 1902 г. Лапик женился на своей университетской ученице Марселле де Эредиа. В 1903 г. Марселла защитила докторскую диссертацию, посвящённую изучению нервных импульсов. У пары не было собственных детей, и они усыновили племянника Лапика — Шарля, рано ставшего сиротой[948]. Шарль получил образование инженера, но в 1940 г. оставил инженерную деятельность ради карьеры художника.

Лапик и его жена тесно сотрудничали в течение почти пятидесяти лет в лаборатории физиологии Сорбонны, опубликовав более восьмидесяти статей. В «Нервной машине» учёный пишет о том, что все предыдущие годы жена была равным партнёром в его исследованиях. После смерти Лапика в 1952 г. Марселла заняла место своего мужа на посту главы лаборатории[949].

Рис. 80. Луи и Марселла Лапик в лаборатории

В рассуждениях о важности результатов работы Лапика для вычислительной нейробиологии нередко можно столкнуться[950, 951, 952] с утверждением, что он является создателем и исследователем первой модели нейрона, носящей название «интегрировать-и-сработать» [integrate-and-fire]. В соответствии с этой моделью алгоритм работы нейрона можно описать следующим образом: когда на вход нейрона подаётся ток, разность потенциалов (напряжение) на мембране возрастает со временем, пока не достигает некоторого порогового значения, при котором происходит скачкообразное изменение потенциала на выходе, напряжение сбрасывается до остаточного потенциала, после чего процесс может повторяться снова и снова.

В действительности связь между возбуждением нерва и образованием нервного импульса во времена Лапика была ещё неясной, и учёный не выдвигал гипотез ни об этом, ни о том, как мембрана возвращается в исходное состояние после выдачи импульса. Это поднимает вопрос о том, кто в действительности предложил модель «интегрировать-и-сработать». Достоверного ответа на него нет. Зато можно с уверенностью сказать, что первые работы, в которых описана модель «интегрировать-и-сработать» в современном виде, относятся к 1960-м годам (хотя сходные идеи звучали и в более ранних статьях). Название для неё предложил Брюс Найт, а одним из первых исследователей стал Ричард Стейн[953].

Принцип «всё или ничего» — Лукас, Эдриан, Като

4.2.4

Рассказав о вкладе Луи Лапика в моделирование нервной деятельности, нельзя не упомянуть работы двух других замечательных нейрофизиологов — Кита Лукаса и Эдгара Эдриана.

Лукас, сын управляющего директора британской Telegraph Construction and Maintenance Company, любил, как и его отец, работать с механическими и электрическими устройствами. Во время учёбы в кембриджском Тринити-колледже Лукас заинтересовался физиологией — эта дисциплина остро нуждалась в создании чувствительных измерительных инструментов. В 1932 г. ученик Лукаса Эдгар Эдриан, ставший к тому времени нобелевским лауреатом, заметил, что *«история электрофизиологии определялась историей приборов для регистрации электрических сигналов»*[954].

Основной сферой интересов Лукаса в области физиологии стала работа мышц. Ему было интересно: почему мышца может сокращаться только частично и как нервная система управляет степенью её сокращения? На этот счёт существовало две гипотезы: или все мышечные волокна могут подвергаться частичному сокращению, или же каждое мышечное волокно может сокращаться только полностью, а при частичном сокращении всей мышцы сокращается лишь часть волокон. Лукас надеялся определить, какая из этих гипотез верна, проводя эксперименты на лягушках. Его логика была довольно проста: если верна вторая гипотеза (сокращается часть волокон), то сокращение будет состоять из конечного числа дискретных шагов, в противном случае функция сокращения будет гладкой[955].

Эксперименты Лукаса с кожной мышцей спины (*M. cutaneus trunci*) лягушки свидетельствовали в пользу «дискретной гипотезы» (её обычно называют «всё или ничего» [all or nothing]), что согласовывалось с результатами более ранних опытов[956, 957] гарвардского исследователя Генри Боудича на сердечных мышцах. Лукас опубликовал[958] свои первые результаты в 1905 г. Затем он продолжил опыты, стимулируя уже нервы, управляющие мышцей. Во второй статье, увидевшей свет в 1909 г., он писал: *«В каждом мышечном волокне сокращение всегда максимально, независимо от силы стимула, который возбуждает нервное волокно».* Последние эксперименты привели Лукаса к вопросу о физиологии нервной деятельности, а именно: можно ли быть уверенным в том, что аксоны также действуют в соответствии с принципом «всё или ничего»?[959, 960] Однако, чтобы дать ответ на этот вопрос, нужны были более чувствительные регистрирующие устройства. Лукас отказался от идеи использования струнного гальванометра, вместо этого он внёс ряд усовершенствований в конструкцию капиллярного электрометра Липпмана с целью повысить чувствительность прибора. С новым измерительным устройством он был готов к новой серии опытов, помощником в которых стал молодой Эдгар Эдриан.

Эдгар Эдриан родился в 1889 г. в богатой лондонской семье. Хотя изначально его привлекали греческий и латинский языки, а также авторы классической эпохи, к 1906 г. у юноши пробудился интерес к естественным наукам. Два года спустя он начал посещать занятия в кембриджском Тринити-колледже, где быстро приобрёл репутацию очень умного и чрезвычайно трудолюбивого студента. В 1911 г., получив учёную степень по физиологии, Эдриан начал работать в лаборатории Лукаса. Сначала — над экспериментом, показывающим, что стимулы, близкие друг к другу во времени, могут суммироваться. Затем Лукас попросил его попытаться определить, действует ли принцип «всё или ничего» для нервов. Хотя Лукасу и удалось усовершенствовать оборудование, но всё же в 1911 г. оно было недостаточно точным, поэтому Эдриан при поиске ответа на главный вопрос был вынужден полагаться на косвенный метод. Последний заключался в том, чтобы поместить сегмент изолированного нерва лягушки в камеру, наполненную парами алкоголя в концентрации, позволяющей ослабить нервный импульс, но не блокировать его полностью[961]. Метод не был изобретением Лукаса и Эдриана: впервые его применил, ещё в XIX в., немецкий медик Альфред Грюнхаген[962], а затем развил немецкий же физиолог Макс Ферворн, которому удалось показать, что величина стимуляции не влияет на способность нервного импульса преодолевать затронутую алкогольными парами зону[963].

Эдриан предположил, что если соблюдается принцип проводимости «всё или ничего», то импульс должен быстро восстановить свою силу после того, как покинет зону воздействия алкоголя. Чтобы проверить эту гипотезу, Эдриан решил расположить на некотором расстоянии от первой затронутой алкоголем зоны вторую и измерить, насколько сильной должна быть в ней концентрация паров алкоголя, чтобы полностью блокировать импульс. Выяснилось, что концентрация паров алкоголя во второй зоне для полной остановки импульса должна быть столь же высокой, как и их концентрация в первой зоне для остановки неослабленного импульса. Эдриан также обнаружил, что вывод Лукаса в отношении мышц выполняется и применительно к нервам: если уровень раздражителя достаточен, чтобы вызвать нервный импульс, то сила данного импульса не зависит от уровня раздражителя (от едва заметного до очень сильного).

Эдриан полагал, что для продолжения исследований ему следует получить медицинское образование, и в 1914 г. он начал клиническую подготовку в лондонском госпитале Святого Варфоломея. К сожалению, Первая мировая война нанесла непоправимый удар по совместным экспериментам учёных. В 1915 г. Эдриан после получения медицинской степени стал врачом и лечил солдат с поражением нервов, контузиями и истерическим параличом. Лукас же присоединился к исследовательскому коллективу Королевского авиационного завода в Фарнборо, где использовал свои инженерные навыки для разработки новых бомбовых прицелов и авиационных компасов. Но в 1916 г. в результате нелепой случайности жизнь Лукаса прервалась — во

время испытания авиационного оборудования его самолёт столкнулся с другим над равниной Солсбери.

После потери наставника Эдриан взял на себя ответственность отредактировать и опубликовать незаконченную книгу Лукаса[964, 965] — «Распространение нервного импульса» (Conduction of the Nervous Impulse)[966], которая увидела свет в 1917 г. Эта работа подробно описывает эффекты, известные Лукасу и Эдриану: рефрактерный период, суммирование нервных импульсов и принцип «всё или ничего». Безусловно, это были захватывающие достижения, но всё же оставалось чувство, что можно достичь гораздо большего — с помощью более чувствительных приборов.

4.2.4

Принцип «всё или ничего» — Лукас, Эдриан, Като

Интересно, что человек, сумевший добиться существенного прогресса в этом направлении, в наши дни не так уж широко известен. Его звали Александр Форбс, и он происходил из богатой бостонской семьи — в «Википедии» вы легко найдёте множество статей, посвящённых его знаменитым родственникам. Мать Александра была дочерью поэта Ральфа Эмерсона, а отец — героем Гражданской войны и президентом телефонной компании Bell. Перед юным Александром было открыто множество дорог, и выбранная им привела его в Гарвард, где он занял главную позицию в футбольной команде университета. Занятия спортом подстегнули у Александра интерес к физиологии. В 1905 г. он получил степень магистра, а спустя ещё пять лет — доктора медицины. После этого Александр выбрал академическую карьеру и остался в стенах Гарварда уже в роли сотрудника факультета физиологии.

Большое впечатление на Форбса оказали исследования Чарльза Шеррингтона, занимавшегося исследованием синаптических связей. Именно Шеррингтон в 1897 г. ввёл в оборот и сам термин «синапс», предложенный специалистом по Античности Артуром Верралом[967].

Для того чтобы лучше изучить работу учёного, Форбс попросил отпуск и вместе с женой отправился на корабле в Великобританию.

Во время поездки он познакомился с работой физиологических лабораторий Кембриджа. Возвратиться в США Александр поначалу предполагал на жемчужине роскошных лайнеров — только что спущенном на воду «Титанике». Однако общение с Лукасом и Эдрианом так увлекло Форбса, что он отменил первоначальное бронирование билетов для себя и своей жены ради того, чтобы провести вместе со своими новыми знакомыми несколько экспериментов. Кто знает, какой была бы история нейрофизиологии, если бы Форбс всё-таки отправился в этот злополучный рейс?

Прибыв домой на другом известном корабле, «Лузитания», Форбс заполнил свою лабораторию оборудованием, подобным тому, которое использовали Лукас и Эдриан. Среди прочего он обзавёлся улучшенным капиллярным электрометром вдобавок к струнному гальванометру Эйнтховена, который уже был на его факультете. Используя знания, полученные у Шеррингтона, Лукаса и Эдриана, Форбс начал с изучения рефлексов у кошек.

Когда разразилась Первая мировая война, он поступил на службу во флот — его и раньше привлекало море, к тому же у Форбса была собственная

яхта, на которой он регулярно плавал. На флоте он применил свои инженерные познания для работы с электрической техникой. Именно здесь он впервые столкнулся с электронными лампами (тогда их называли «аудионами»), позволявшими усиливать радиосигналы с минимумом искажений. После окончания войны Форбс использовал эти лампы, чтобы сконструировать новый усилитель для физиологических исследований. В 1919 г., когда он подключил свой термоэмиссионный усилитель к цепи, включавшей нерв и струнный гальванометр Эйнтховена, он обнаружил, что может усилить едва уловимый нервный импульс в целых пятьдесят раз. В течение нескольких следующих лет Форбс подробно описал свой усилитель и провёл с его помощью несколько исследований. Большая часть из них подтвердила результаты других исследователей. Хотя сам Форбс и не сделал каких-либо прорывных открытий в области физиологии, но он смог совершить в этой области настоящую технологическую революцию, важность которой была немедленно признана другими нейрофизиологами.

Эстафету у Форбса приняли «аксонологи» [axonologists] (как называл их Форбс) Герберт Гассер и Джозеф Эрлангер из Университета Вашингтона в Сент-Луисе (Washington University in St. Louis, WUSTL). Гассер вместе с талантливым конструктором Гарри Ньюкомером сконструировал многокаскадный усилитель. Это устройство позволяло передавать выходной сигнал одного лампового усилителя на вход следующего усилителя, что сделало возможным ещё большее усиление слабого входного сигнала. Строго говоря, Гассера, Эрлангера и Ньюкомера нельзя считать прямыми «наследниками» Форбса, поскольку собственные эксперименты по усилению нервных импульсов при помощи электронных ламп они начали ещё до вступления США в Первую мировую войну, однако Форбсу удалось первым опубликовать свои результаты[968, 969].

Ещё одним важным шагом вперёд стало появление чувствительного катодного осциллографа, созданного инженерами компании Western Electric. Хотя инженеры компании и оказывали некоторую помощь учёным в работе над многокаскадным усилителем, Western Electric отказалась продать исследователям экспериментальную катодную лампу, лежащую в основе устройства, поэтому Гассеру и его коллегам пришлось самостоятельно смастерить её аналог в своей лаборатории. Подключив осциллограф к усилителю, Гассер и Эрлангер впервые в истории смогли получить временну́ю развёртку отдельных нервных импульсов.

Этот технологический прорыв принёс учёным удивительное открытие: оказалось, что то, что прежде считалось отдельным потенциалом действия, на деле представляло собой совокупность импульсов от различных типов аксонов, сплетённых вместе в единое нервное волокно. Исследования различных нервов показали, что нервные импульсы быстрее распространяются вдоль толстых аксонов, чем вдоль тонких. Это стало блестящим подтверждением гипотезы, предложенной в 1907 г. шведским физиологом Густавом Гётлином. В конце 1920-х гг. Эрлангеру и Гассеру удалось показать, что слабо

4.2.4

Принцип «всё или ничего» — Лукас, Эдриан, Като

концентрированный раствор местного анестетика, обеспечивающий эффективную блокаду тонких нервных волокон, неспособен блокировать распространение нервного импульса в толстых волокнах[970, 971]. Интересно, что в исследованиях Лукаса и Эдриана эффективность блокады нервного импульса парами алкоголя зависела от протяжённости участка блокады, что на первый взгляд выглядело весьма логично. Однако, когда этот результат попыталась произвести группа японских исследователей во главе с Гэнъити Като, выяснилось, что результаты экспериментов не согласуются с наблюдениями Эдриана.

Като не смог подтвердить зависимость времени достижения полной блокады нервной проводимости от длины участка нерва, подвергающегося обработке парами алкоголя. Эксперимент Эдриана был повторён с большой точностью с использованием различных анестетиков (алкоголя, хлороформа, уретана, хлоралгидрата, кокаина): время достижения блокады (определяемое путём регистрации сокращений мышц или измерением амплитуды электрического сигнала на участках нерва, расположенных после затронутой алкоголем зоны) было одинаковым вне зависимости от протяжённости данной зоны. Като предположил, что ошибка в опытах Эдриана была связана с тем, что при малой длине затронутого парами алкоголя участка не удавалось добиться той же концентрации паров, как в случае более длинного участка[972]. Этот результат вызвал нешуточную полемику в среде нейрофизиологов. Выводы Лукаса и Эдриана активно поддерживал немецкий физиолог Макс Ферворн, авторитет которого был чрезвычайно высок. Именно с его именем ассоциировалась в первую очередь «теория убывания» [decrement theory], в основе которой лежало предположение о том, что сила нервного импульса убывает постепенно по мере прохождения участка блокады. Като же стал основателем альтернативной парадигмы, получившей название «теория неубывания» [decrementless theory]. Драматизма этой полемике добавила позиция учителя Като — Хидэцурумару Исикавы, который был учеником Ферворна. Като впервые представил свои результаты на собрании Японского физиологического общества, состоявшемся в Фукуоке в апреле 1923 г. Вот как сам Като описывает реакцию учителя на свой доклад:

Когда я уже собирался ликуя сойти с трибуны после прочтения своей статьи, он, покраснев от ярости, встал и сказал мне, что «подвергать критике профессора Ферворна так, как это сделано в таком незрелом исследовании, как ваше, — акт высокомерия. Верите ли вы, что такие обширные экспериментальные результаты, как у профессора Ферворна и доктора Лукаса, можно объяснить при помощи такой дрянной идеи, как теория неубывания? Дайте мне два часа, и я разнесу теорию Кейо (университета, где работал Като. — *С. М.*) *на куски! Что скажете?» Гром среди ясного неба! Он был искренним последователем этих двух учёных. Несколько лет он учился у Ферворна. Я, побледнев, замер в углу сцены, не проронив в ответ ни слова из тех возражений, которые можно было бы представить в ответ на его яростный упрёк.*

Опустив глаза, я вернулся на своё место. В моей жизни не было ничего более шокирующего. Я не мог понять, почему профессор Исикава так покраснел от гнева, потому что был твёрдо уверен, что он меня похвалит. Я был достаточно глуп и не знал, что нельзя оценивать людей своей меркой.

4.2.4

Принцип «всё или ничего» — Лукас, Эдриан, Като

Несмотря на столь тяжёлый удар, Като опубликовал результаты в монографии «Теория неубывающего распространения» (The Theory of Decrementless Conduction), которая была завершена в 1924 г. Он разослал работу по ведущим университетам мира и в том же году получил подтверждение своей теории в опытах Форбса, который воспроизвёл опыты Като, используя нервы кошек. Чтобы окончательно убедить научный мир в своей правоте, Като и его коллеги решили представить полученные результаты на XII Международном конгрессе по физиологии, который должен был состояться в Стокгольме в 1926 г.

Надо сказать, что воплощение в жизнь этого плана было связано с нешуточными трудностями: Като и его коллеги ставили свои опыты на японских черепахах, которые могли и не перенести предстоящее многодневное путешествие по Транссибирской магистрали. Хищные черепахи признавали только живую пищу, что создавало учёным дополнительные проблемы. Советская Россия 1920-х гг. представлялась довольно опасным местом — по словам Като, «все железные дороги и станции были заняты рабочими и крестьянами». Впрочем, советские власти снабдили Като и его коллег специальной «защитной грамотой», так что учёным удалось без ущерба здоровью добраться до Стокгольма, чего, к сожалению, нельзя было сказать о черепахах — несмотря на все принятые меры предосторожности, животные не пережили путешествия.

К счастью для Като и его коллег (и к несчастью для лягушек), замену удалось найти на месте.

Вот как описывает сам Като ход экспериментов:

Доктор Фёлих (последователь Ферворна) был весь внимание и наблюдал за происходящим широко открытыми глазами. В наркотизирующей камере были натянуты два отрезка седалищных нервов (длиной 3,0 и 1,5 см), взятые с правой и левой стороны одной и той же лягушки из Голландии. Время угасания [нервных импульсов] предполагалось измерить в присутствии зрителей. Результаты были следующими: в более длинном отрезке проводимость была полностью приостановлена спустя 24 минуты и 16 секунд, а в более коротком — спустя 24 минуты и 15 секунд, и хотя в случае последнего процесс занял на секунду меньше, но время было практически одинаковым. Как отмечалось позже, моё объявление о результатах эксперимента было слишком напряжённым, точнее — мой голос срывался на фальцет под влиянием переполняющего меня восторга. Меня не так сильно волновал второй эксперимент, потому что провал в нём был значительно менее вероятен. Как и ожидалось, два импульса, сильный и слабый, исчезли одновременно. Но оставался ещё третий эксперимент — по разрезанию. К этому моменту я в целом успокоился. По

истечении времени угасания [нервных импульсов] в наркотизированной области в неё были даны два электрических стимула, сильный и слабый. Слабый стимул не вызывал мышечных сокращений, в отличие от сильного. До этого момента всё было так, как утверждал Ферворн. Сразу после этого наркотизированная область должна была быть разрезана в том месте, куда подавался электрический стимул. Это должно было показать, что сильный электрический стимул вызывает сокращение мышцы, в то время как разрез (механическое раздражение) не вызывает его. Когда доктор Утимура сразу после электрической стимуляции собрался выполнять разрез, из глубины зала раздался голос: «Отсюда не видно состояния мышц!» Действительно, многие наблюдатели хотели своими глазами увидеть, будет ли сокращаться мышца или нет. Это был доктор Бёйтендейк, профессор Университета Гронингена в Голландии, бывший ближе всего к столу, который предложил объявлять остальным, будет ли движение мышцы или нет. Доктор Утимура снова взял ножницы и поднёс их к нерву, чтобы разрезать его. Его рука дрожала; это могло оказать некоторое давление на нерв и привести к сокращению мышцы. У меня не хватило смелости наблюдать сам момент разреза. Шли секунды. Неожиданно прозвучало: «Keine Zuckung!!» [Нет сокращения!!] Это был голос профессора Бёйтендейка. Следом прозвучал другой возглас: «Revolution der Physiologie!» [Революция в физиологии!], автора которого я не смог определить. Учёные один за другим поздравляли меня и жали мне руку. Профессор Кремер из Берлина и профессор Ашер из Бернского университета похлопали меня по плечу и сказали: «Демонстрационные эксперименты обычно проходят не так хорошо, как это должно быть. Но сегодня они были необычайно успешны, просто превосходны». Здесь, в Японии, где я родился, ко мне никогда не относились с таким участием, едва не вызвавшим у меня на глазах невольные слёзы[973].

Когда в 1932 г. Эдгар Эдриан был удостоен (совместно с Чарльзом Шеррингтоном) Нобелевской премии за «открытия, касающиеся функций нейронов», в своей нобелевской речи он упомянул вклад Като в устранение первоначальных заблуждений[974]. В 1944 г. Нобелевскую премию получили и Гассер с Эрлангером — «за открытия, имеющие отношение к высокодифференцированным функциям отдельных нервных волокон»[975].

В то время как другие учёные развивали исследования Эдриана, сам он постепенно отошёл от изучения влияния анестетиков на распространение нервных сигналов, сосредоточившись на более общих вопросах, связанных с генерацией и распространением нервных импульсов. Например, ему впервые в истории науки удалось зарегистрировать электрическую активность отдельной клетки. Благодаря работам Эдриана мы узнали, что частотно-импульсная модуляция * — это способ, при помощи которого нервные клетки могут представлять информацию в виде электрических сигналов. Более того,

* Частотно-импульсная модуляция — такой вид импульсной модуляции, при которой управление средним значением выходного параметра осуществляется за счёт изменения частоты следования импульсов, обладающих неизменной длительностью.

4.2.4

Принцип «всё или ничего» — Лукас, Эдриан, Като

термин «информация» в нейрофизиологическом контексте, по-видимому, впервые был использован именно Эдрианом — в 1928 г. он применил его для обозначения сообщения, связанного с электрическими нервными импульсами сенсорных волокон[976].

Интересно, что вклад Эдриана в развитие нейрофизиологии не ограничился его собственными исследованиями. Например, именно он привлёк внимание научной общественности к исследованиям Бергера. К 1933 г. немецкий учёный опубликовал семь из четырнадцати своих отчётов, и все они остались не замеченными коллегами и прессой. Когда Эдриан впервые познакомился с работами Бергера в 1934 г., он поначалу скептически отнёсся к этому исследованию и решил повторить эксперименты Бергера, рассчитывая, что ему удастся опровергнуть существование альфа-волн. Каково же было его изумление, когда он обнаружил эти волны в мозгах коллег по лаборатории! Эдриан использовал свой авторитет нобелевского лауреата и знаменитого электрофизиолога для популяризации работы, которая изначально не нравилась даже самому Бергеру, причём настойчиво подчёркивал вклад последнего, дав альфа-волнам альтернативное название «ритм Бергера».

Помимо привлечения внимания общественности к открытиям Бергера, Эдриан и его коллега Брайан Мэтьюз значительно усовершенствовали машину немецкого учёного, снабдив её усилителем сигнала, а также реализовав возможность записи сигнала одновременно из нескольких областей мозга. Кроме того, Мэтьюз собрал струйный осциллограф для улучшения визуализации регистрируемых сигналов. С помощью этого оборудования Эдриан и Мэтьюз подтвердили многие открытия Бергера и представили собственные данные. Например, они отметили, что альфа-ритм был особенно сильным, когда электроды располагались над затылочной долей мозга, которая, как считалось (и считается), задействована в обработке зрительных сигналов. Эдриан и Мэтьюз проанализировали зависимость данных электроэнцефалограммы в различных визуальных условиях (например, в полной темноте, при вспышках света и т. д.) и пришли к выводу, что альфа-ритм специфичен для нейронов, обрабатывающих зрительную информацию, — интерпретация, которая противоречила утверждению Бергера о том, что альфа-волны — это результат работы всего мозга в целом, связанный с умственной деятельностью. Признавая, что его собственный альфа-ритм практически неотличим от альфа-ритма водяного жука, Эдриан не решился связать его со сложным познавательным процессом[977].

Что же касается Като, то он так и не стал лауреатом Нобелевской премии, хотя и был неоднократно номинирован на неё, в том числе и Иваном Петровичем Павловым. Как и опыты Эдриана, эксперименты Като оказали большое влияние на дальнейшее развитие нейрофизиологии. Стремясь преодолеть трудности, связанные с интерпретацией экспериментов по блокированию проводимости нервных стволов, и доказать свою «теорию неубывания», Като и его коллеги разработали в начале 1930-х метод, который позволил производить анатомическое разделение живого нервного волокна.

Эта процедура послужила важным подспорьем при изучении «микрофизиологии» нервов, в частности для исследования роли перехватов Ранвье в распространении нервных импульсов в миелинизированных волокнах.

Немного о термине «миелинизированные». Дело в том, что оболочки нервных волокон позвоночных значительно различаются по своему строению, и в зависимости от этого оболочки разделяют на миелиновые (мякотные) и безмиелиновые (безмякотные), последние сходны по строению с нервными волокнами беспозвоночных. Сами же волокна, в зависимости от типа оболочки, называют миелинизированными или немиелинизированными. Те и другие состоят из отростков (аксонов) нервных клеток, но в случае миелинизированных волокон аксоны окружены электроизолирующей оболочкой. Миелиновая оболочка состоит из глиальных клеток: в периферической нервной системе это шванновские клетки, а в центральной нервной системе — олигодендроциты. Данная оболочка формируется из плоского выроста тела глиальной клетки, который многократно оборачивает аксон подобно изоленте. Цитоплазма в этом выросте практически отсутствует, поэтому миелиновая оболочка по сути представляет собой множество слоёв клеточной мембраны.

Миелинизированные нервные волокна характерны для соматического отдела нервной системы, управляющего скелетной мускулатурой, а для вегетативного отдела, регулирующего деятельность внутренних органов, характерны немиелинизированные волокна.

В покрытии миелинизированных волокон по всей их длине регулярно (через каждые 1–2 мм) расположены микроскопические разрывы миелиновой оболочки, получившие название перехватов Ранвье — в честь своего первооткрывателя, французского гистолога и анатома Луи Антуана Ранвье. По сути, перехваты Ранвье — это промежутки между двумя смежными клетками, образующими миелиновую оболочку нервного волокна. Хотя перехваты Ранвье открыты ещё в XIX в., их функция долгое время оставалась неясной.

Но, благодаря экспериментам Като по блокированию проводимости, в 1950-х гг. Исидзи Тасаки, Тайджи Такеуси, Эндрю Хаксли и Роберт Штемпфли смогли провести исследования отдельных волокон и установить сальтаторный (скачкообразный, от лат. *saltare* — прыгать, скакать) характер проводимости в миелинизированных нервах.

О том, какие конкретные биологические и электрохимические механизмы лежат в основе сальтаторной проводимости и нервной проводимости вообще, мы поговорим в следующем разделе.

Два английских джентльмена и долгопёрый прибрежный кальмар 4.2.5

Дальнейшее развитие идей Лапика в рамках вычислительной нейробиологии привело к появлению множества более точных и полных моделей биологического нейрона. В их числе модели «интегрировать-и-сработать с утечками» [leaky integrate-and-fire], «интегрировать-и-сработать с утечками дробного порядка» [fractional-order leaky integrate-and-fire], модель Гальвеса — Лёхербах [Galves–Löcherbach model], «экспоненциальный вариант модели „интегрировать-и-сработать“» [exponential integrate-and-fire] и многие другие. Поскольку погружение в пучины вычислительной нейробиологии стоило бы нам нескольких сотен страниц, переполненных формулами и экспериментальными данными, мы остановимся здесь только на одном из ключевых исследований в этой области, обойти которое никак нельзя — тем более что его авторы в 1963 г. получили за него Нобелевскую премию в области физиологии и медицины. Речь, разумеется, об исследованиях сэра Алана Ходжкина, ученика Эдриана, и сэра Эндрю Хаксли. Эти два почтенных английских джентльмена навсегда останутся в истории науки благодаря тому, что любили резать кальмаров не только за ужином, но и на протяжении всего рабочего дня.

Интересно, что Эндрю Хаксли был не только братом другого знаменитого биолога, Джулиана Хаксли, одного из основателей Синтетической теории эволюции, не только братом знаменитого писателя Олдоса Хаксли (подарившего миру знаменитый роман-антиутопию «О дивный новый мир»), но и внуком Томаса Гексли, известного учёного-эволюциониста и популяризатора науки, получившего прозвище Бульдог Дарвина. Как вы уже, наверное, догадались, Гексли и Хаксли — это одна и та же фамилия, которую в разные годы по-разному записали по-русски.

Долгопёрый прибрежный кальмар (*Doryteuthis pealeii*), как и другие кальмары, является чрезвычайно удобным для нейрофизиологов модельным организмом благодаря наличию у него гигантских аксонов.

Гигантский аксон кальмаров — это очень большой (обычно около 0,5 мм в диаметре, но иногда достигает 1,5 мм) аксон, который контролирует часть водореактивной системы кальмара, используемой им в основном для коротких, но очень быстрых перемещений в воде. Впервые гигантский аксон описан Леонардом Уильямсом в 1909 г., однако это открытие было забыто более чем на двадцать лет, вплоть до исследований английского зоолога и нейрофизиолога Джона Янга в 1930-е гг.

Между щупальцами кальмара расположен сифон, через который вода может быстро выталкиваться за счёт сокращений мышц стенки тела животного. Это сокращение инициируется потенциалами действия в гигантском аксоне. Поскольку электрическое сопротивление обратно пропорционально площади поперечного сечения объекта, потенциалы действия распространяются

быстрее в большем аксоне, чем в меньшем. Поэтому увеличение диаметра гигантского аксона поддерживалось в процессе эволюции, так как позволяло увеличить скорость мышечной реакции.

Это стало настоящим подарком для Ходжкина и Хаксли, которых интересовал ионный механизм потенциалов действия, — ведь благодаря большому диаметру аксона в его просвет можно было невозбранно установить электроды!

Рис. 81. Долгопёрый прибрежный кальмар

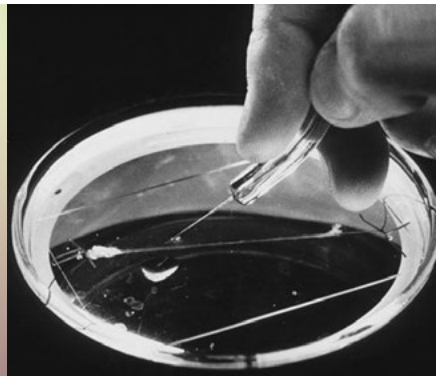


Рис. 82. Гигантский аксон кальмара

В итоге учёные создали модель Ходжкина — Хаксли, но для её рассмотрения надо вначале поговорить о механизмах, лежащих в основе нервной проводимости.

Мембрана (оболочка) нейрона поляризована. Это означает, что существует постоянная разность потенциалов между внутренней и наружной поверхностью клеточной мембраны. Эта разность получила название «мембранный потенциал». Мембранный потенциал нейрона в обычном состоянии («потенциал покоя») отрицателен и у млекопитающих равен примерно –70 мВ. Смещение мембранного потенциала в отрицательную сторону относительно потенциала покоя называется гиперполяризацией, а в положительную — деполяризацией. Под воздействием слабых (подпороговых) импульсов электрического тока в клетке возникает «электротонический потенциал», то есть сдвиг мембранного потенциала клетки, вызываемый действием постоянного электрического тока. Передача импульса по нервным волокнам происходит в виде волны возбуждения, в основе которой лежат электротонические потенциалы и потенциалы действия, которые распространяются вдоль нервного волокна.

В участках нервного волокна, изолированных миелиновыми оболочками, распространение электрических импульсов происходит очень быстро, скачкообразно. Почему это происходит, позволяет понять школьный курс физики. Электрический ток — это направленный поток частиц — носителей электрического заряда в проводнике. Такими частицами в случае металлов

4.2.5

Два английских джентльмена и долгопёрый прибрежный кальмар

являются электроны, а в случае электролитов — ионы. Цитоплазма нейронов — это электролит, в котором функцию переноса зарядов выполняют различные типы ионов. Вообще говоря, этих типов ровно четыре: положительно заряженные ионы калия, кальция и натрия и отрицательно заряженные ионы хлора. Пока разность потенциалов на разных концах изолированного проводника отсутствует, заряженные частицы движутся хаотически, в разных направлениях. Как только возникает разность потенциалов на одном из концов проводника, частицы практически мгновенно выстраиваются в цепочку, благодаря чему тут же возникает разность потенциалов на втором конце изолированного проводника. Распространение электрического сигнала тем самым происходит со скоростью света, что куда быстрее скорости перемещения самих заряженных частиц в проводнике. Например, скорость движения электронов в металлическом проводнике составляет доли миллиметра в секунду (величина этой скорости зависит от величины разности потенциалов), а скорость распространения электрического тока — порядка 300 000 км/с.

Однако в случае, когда проводник не изолирован или изолирован плохо, скорость распространения сигнала сильно падает из-за утечек. Мембраны нейронов содержат молекулярные механизмы, отвечающие за регуляцию разности потенциалов между внутренним пространством клеток и внешней средой. Это ионные насосы (помпы) и ионные каналы.

Ионные насосы — специальные белки, которые обеспечивают активный перенос ионов из области с меньшей концентрацией в область с большей концентрацией за счёт энергии гидролиза аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ). Именно в результате работы ионных насосов создаётся и поддерживается разность концентрации ионов по обе стороны мембраны (так называемый трансмембранный ионный градиент).

Ионные каналы — белки (или белковые комплексы), которые обеспечивают пассивный транспорт ионов из области с большей концентрацией в область с меньшей концентрацией как раз за счёт разности концентраций. Ионные каналы делятся на селективные и неселективные. Последние всегда находятся в открытом состоянии и пропускают все типы ионов (при этом их проницаемость для положительно заряженных ионов кальция значительно выше, чем для других ионов). Селективные каналы пропускают только один вид ионов — для каждого вида ионов существует свой вид каналов. При этом селективные каналы могут находиться в одном из трёх состояний: активированном, инактивированном и закрытом[978].

Кроме того, в зависимости от способа управления, ионные каналы подразделяются на потенциал-зависимые (потенциал-управляемые), лиганд-зависимые (лиганд-управляемые), стимул-управляемые, неуправляемые, а также некоторые другие, на которых мы не будем заострять особого внимания.

Потенциал-зависимые ионные каналы открываются и закрываются в ответ на изменение мембранного потенциала. Лиганд-зависимые каналы открываются, когда вещество-нейромедиатор, связываясь с их наружными

рецепторными участками в синаптической щели, меняет их конформацию (т. е. пространственное расположение атомов в молекуле). Стимул-управляемые каналы открываются ввиду действия какого-либо стимула и бывают механочувствительные, протон-активируемые, температурно-чувствительные и так далее. Что касается неуправляемых каналов, то они, как можно догадаться из их названия, постоянно находятся в открытом состоянии[979, 980].

Однако даже и в изолированном миелином нервном волокне электрический сигнал постепенно затухает. Поэтому, чтобы компенсировать этот эффект, и требуются упомянутые ранее перехваты Ранвье. Они выполняют роль своеобразных «трансформаторных подстанций», усиливающих сигнал до необходимого уровня. Таким образом, электрический импульс в миелинизированных волокнах перескакивает от одного перехвата к другому, чтобы получить в нём очередное подкрепление. Такой механизм хорошо объясняет экспериментальные результаты, полученные Эдрианом, Като и их коллегами.

Возможность быстрой передачи нервных сигналов по миелинизированным нервным волокнам стала важным эволюционным преимуществом позвоночных организмов, увеличив скорость их мышечной реакции на внешние раздражители и позволив им увеличиваться в размерах. В наши дни учёные продолжают изучение механизмов действия перехватов Ранвье. Например, исследуются механизмы, связанные с влиянием на их функции инфракрасного излучения[981, 982]. Не исключено, что дальнейшие исследования помогут ещё лучше уточнить детали устройства тонкой биохимической и биофизической «машинерии».

Теперь можно наконец и рассмотреть модель Ходжкина — Хаксли. Она представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, которая приближённо описывает электрические характеристики возбуждаемых клеток. Модель сопоставляет каждому компоненту клетки его физический аналог, рассматривая его в качестве элемента электрической цепи.

Внутреннему липидному слою клеточной мембраны соответствует электроёмкость C_m. Потенциал-зависимые ионные каналы обеспечивают нелинейную

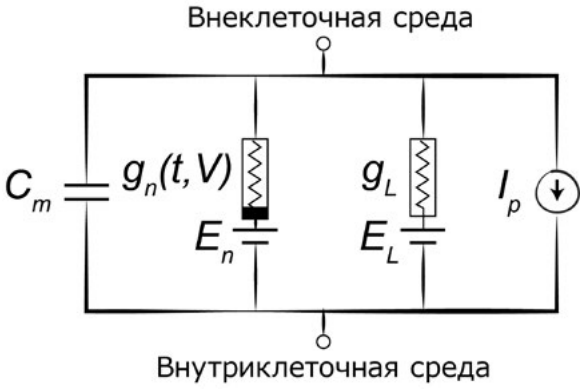


Рис. 83. Электрическая схема, соответствующая модели Ходжкина — Хаксли

4.2.5

Два английских джентльмена и долгопёрый прибрежный кальмар

электропроводность g_n (где n — отдельный вид ионных каналов), зависящую от величины потенциала и времени. Эта часть системы, как было обнаружено в более поздних исследованиях, базируется на белковых молекулах, образующих потенциал-зависимые ионные каналы. Вероятность открытия канала зависит от электрического потенциала (или электрического напряжения) мембраны клетки. Как мы уже знаем, каналы мембранных пор обеспечивают пассивный переток ионов в направлении области с их меньшей концентрацией. Участок цепи, соответствующий электропроводности g_L, отвечает как раз за возникающий в результате этого электрический ток, называемый «током утечки» (L от англ. *leak* — течь, утечка). Разность концентрации ионов, ввиду которой ионы перемещаются через мембранные каналы, показана на схеме при помощи источников напряжения с электродвижущей силой E_n и E_L. Ионные насосы соответствуют источникам тока I_p [983].

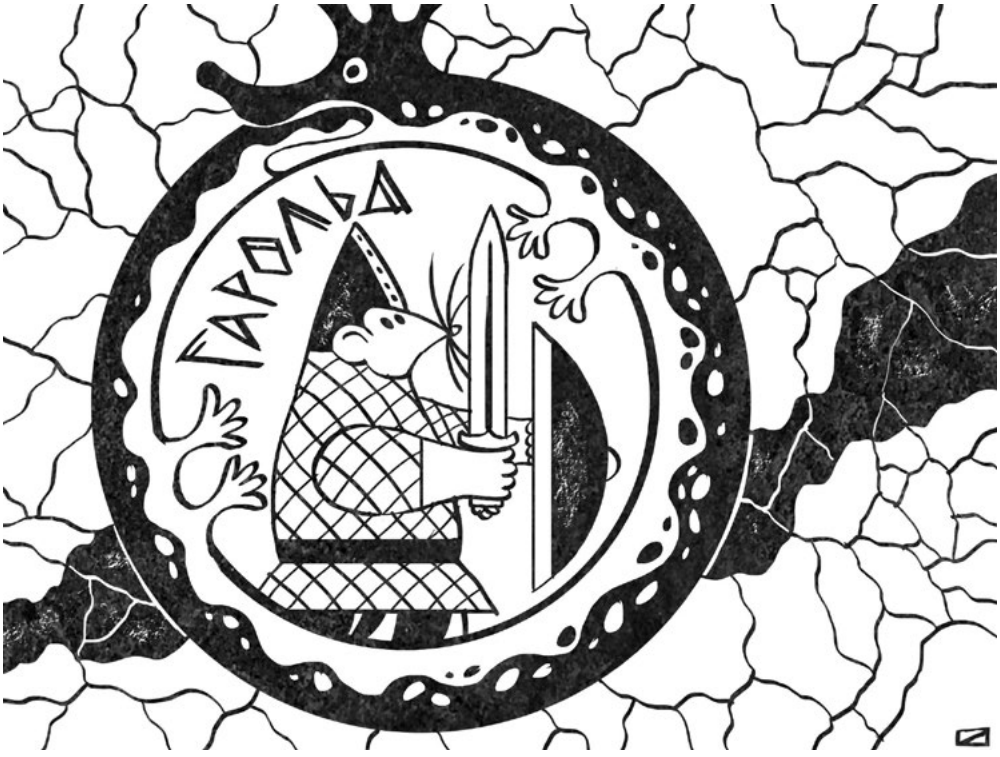
Модель Ходжкина — Хаксли считается одним из величайших достижений биофизики XX в. Со временем она подверглась модификациям и улучшениям. На базе экспериментальных данных в модель были добавлены новые виды ионных каналов и транспортёров. Модель была модифицирована с целью её согласования с теорией переходного состояния, что привело к созданию термодинамических моделей Ходжкина — Хаксли [984]. Создание стохастических (т. е. связанных со случайностью, от греческого слова στοχαστικός — умеющий угадывать) моделей поведения ионных каналов привело к появлению стохастических гибридных систем, в которых детерминистические описания непрерывной динамики сочетаются со скачкообразными марковскими процессами [985], а также модели Пуассона — Нернста — Планка (PNP) для моделирования процессов ионного обмена в каналах. Дело в том, что ионные каналы — это весьма сложные приспособления, для моделирования которых необходимо учитывать самые разные физические и химические эффекты. Здесь есть место как для электрохимии, так и для гидродинамики. Через каждый канал может проходить от миллиона до 100 млн ионов в секунду, при этом на открытие или закрытие канала уходит всего порядка миллисекунды, и оно может происходить под влиянием разных механизмов, а на активность работы канала оказывает влияние несколько модулирующих факторов [986, 987]. Именно поэтому модели, учитывающие все особенности работы ионных каналов, являются весьма сложными.

Учёными было разработано несколько упрощённых моделей нейронов (таких как модель Фитцхью — Нагумо [988] или модель Ижикевича [989]), облегчающих эффективное крупномасштабное моделирование их групп. Кроме того, современные модели обычно подразумевают наличие разветвлённой структуры аксонов и дендритов [990].

4.2.6 Мышонок Гарольд и его увлекательная жизнь после смерти

В наши дни нейробиологи обладают весьма изощрёнными инструментами для воссоздания так называемых коннекто́мов — карт связей нейронов в нервной ткани. Один из наиболее интересных проектов в этой области осуществляется учёными из лаборатории Себастьяна Сеунга в Принстонском университете, а ранее — в MIT (Massachusetts Institute of Technology, Массачусетский технологический институт). Ближайшей целью проекта является создание карты связей нейронов сетчатки мышонка по имени Гарольд. Сетчатка — это часть мозга, осуществляющая первичную обработку зрительной информации. Она была выбрана в качестве модельного объекта для обкатки технологий, необходимых для достижения долгосрочной научной цели — полного описания коннектома мозга человека.

По всей видимости, в силу того, что при жизни Гарольд был хорошим мышонком, после смерти его тельце не было отправлено в утиль (по крайней мере полностью). Мышиный мозг извлекли из черепной коробки и нарезали на тонкие слои при помощи микротома (инструмента для приготовления тонких срезов образцов). Полученные срезы пропустили через электронный микроскоп в Институте медицинских исследований Общества Макса Планка,



4.2.6

Мышонок Гарольд и его увлекательная жизнь после смерти

в результате чего в 2010 г. был сформирован большой массив изображений[991], который и использовали исследователи из MIT. Когда сотрудники лаборатории осознали, что воссоздание карты связей одного-единственного нейрона требует около пятидесяти часов рабочего времени специалиста и картирование сетчатки мыши у группы из ста учёных займёт почти двести лет, стало ясно, что необходимо принципиально иное решение. И оно было найдено. Им стало создание онлайн-игры EyeWire, в которой игроки соревнуются друг с другом в деле окраски фотографий срезов мышиного мозга.

Карта сетчатки состоит из множества частей (кубов), каждую из которых должны обработать несколько игроков. Экран игры разделён на две части, слева — трёхмерная модель нейрона, которую можно поворачивать и двигать, справа — множество наложенных друг на друга снимков последовательно идущих слоёв. Прокручивая двумерные снимки сетчатки, можно представить объёмную картину, при этом по модели вертикально движется прозрачная планка: так игра даёт понять, какой слой просматривает игрок. Чтобы «восстановить» ветки нейрона, нужно закрасить соответствующие фрагменты на фотографиях.

После завершения работы над кубом программа сравнивает решения, определяет, какое из них верное, и присуждает очки. Искать ошибки в нейронной карте приходится учёным и самим игрокам, поэтому в сообществе EyeWire создана строгая иерархия. Для каждой роли определены требования, возможности и обязанности. Продвинутые игроки делятся на «скаутов» (помечают подозрительные кубы), «жнецов» (исправляют ошибки), «модераторов» (поддерживают порядок в чате) и «менторов» (помогают игрокам).

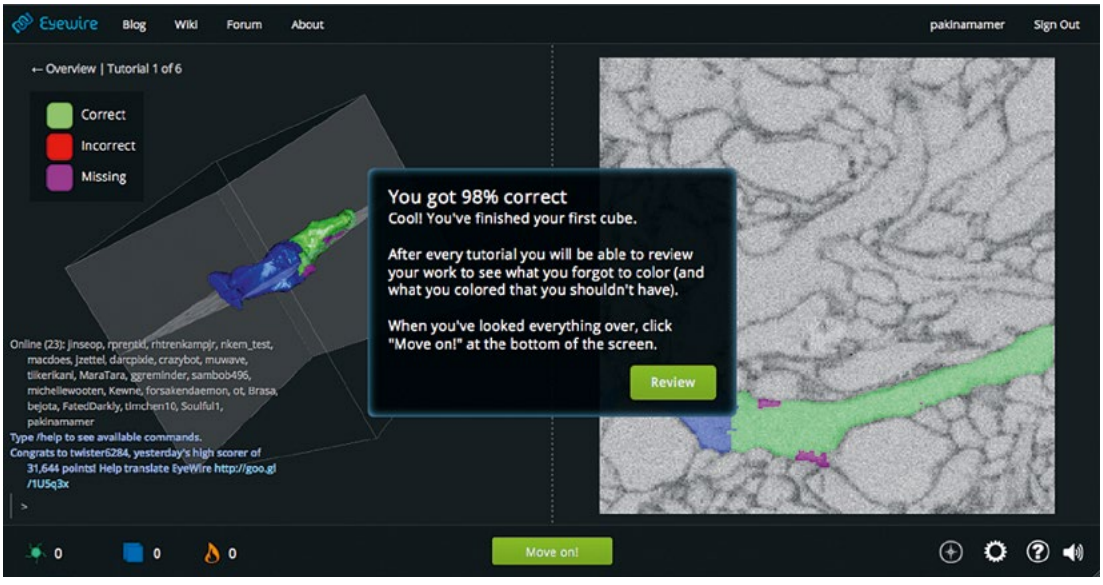


Рис. 84. Игра EyeWire

В 2014 г., через два года после запуска EyeWire, сотрудники лаборатории сделали первое открытие и рассказали о нём в журнале *Nature*. Учёным удалось выяснить, как именно млекопитающие распознают движение. То, что в процессе участвует не только зрительная кора (часть коры головного мозга, отвечающая за обработку зрительного сигнала), но и сетчатка, уже было известно, но сам механизм подробно изучен не был[992].

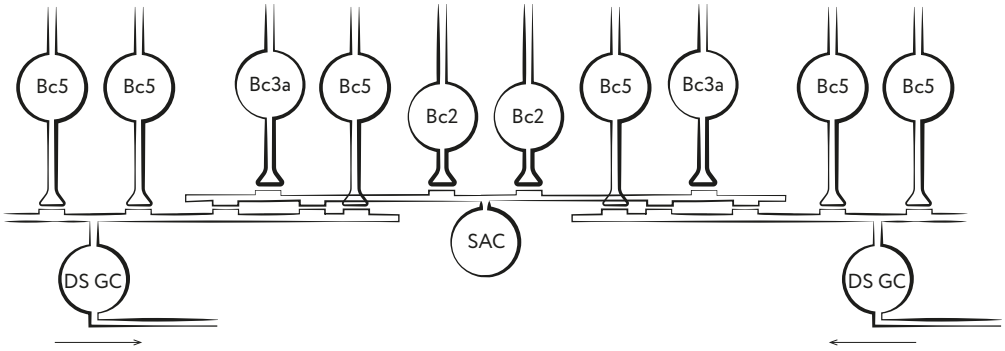


Рис. 85. Схема организации дирекциональной избирательности ганглиозных клеток сетчатки. SAC — звёздчатая амакриновая клетка (ЗАК); Bc2 — биполяры, образующие синапсы на дендрите ЗАК вблизи тела клетки; Bc3a — биполяры, образующие синапсы на дендрите ЗАК вдали от тела клетки; Bc5 — биполяры, образующие возбудительные синапсы на дендритах дирекционально избирательных ганглиозных клеток; DS GC — дирекционально избирательные ганглиозные клетки, выделяющие противоположные направления движения стимулов, левая DS GC — слева направо, правая DS GC — справа налево (обозначено стрелками)

Когда свет попадает на клетки фоторецепторов, они передают сигнал биполярным клеткам *, затем амакриновым ** — и, наконец, ганглионарным ***.

Учёные проанализировали 80 амакриновых нейронов (29 из них помогли описать игроки EyeWire) и соединённые с ними биполярные клетки. Они заметили, что разные типы биполярных клеток по-разному соединяются с амакриновыми нейронами: биполярные клетки одного типа располагаются далеко от тела (сомы) звёздчатой клетки и передают сигнал быстро, клетки другого типа располагаются близко, но сигнал передают с задержкой.

* Биполярные клетки (bipolar cells) обычно имеют веретенообразную форму и два отростка (один аксон и один дендрит), именно поэтому их и называют биполярными. В сетчатке они соединяют через синапсы одну колбочку или несколько палочек зрительной системы с одной ганглионарной или амакриновой клеткой (последнее характерно для биполярных клеток палочек).

** Амакриновые клетки (amacrine cells) получили название от греческой приставки α (не-) и слов μακρός (длинный) и ίνα (волокно). Амакриновые клетки — это тормозящие нейроны, выходы которых соединяются с ганглионарными клетками сетчатки и/или с биполярными клетками.

*** Ганглионарные клетки (retinal ganglion cells, RGC) — слой нейронов, расположенных в непосредственной близости от внутренней поверхности сетчатки. Они генерируют сигналы, которые затем передаются в зрительную кору.

Если стимул в поле зрения удаляется от тела (сомы) звёздчатой амакриновой клетки, то первой активизируется «медленная» биполярная клетка, затем — «быстрая». Тогда, несмотря на задержку, сигналы клеток обоих типов достигают звёздчатого амакринового нейрона одновременно, он испускает сильный сигнал и передаёт его дальше ганглионарным клеткам. Если же стимул движется по направлению к соме, сигналы разных типов биполярных нейронов не «встречаются» и сигнал амакриновой клетки получается слабым[993].

Разумеется, игра EyeWire в силу присущей ей некоторой криповатости не входит в топы рейтингов онлайн-игр, а следовательно, объём людских ресурсов, привлекаемых в рамках этого образчика гражданской науки [civil science], весьма ограничен. Однако создатели и не рассчитывали на то, что в данном проекте можно будет полагаться только на ресурсы краудсорсинга. Размеченные игроками данные были использованы для того, чтобы обучить на них соответствующие модели машинного обучения, которые затем смогут выполнять раскраску самостоятельно[994]. Своеобразная ирония заключается в том, что в основе этих моделей лежат свёрточные нейронные сети (о них мы поговорим подробно несколько позже), созданные, в свою очередь, под влиянием научных данных, полученных в ходе изучения зрительной коры головного мозга. Так что EyeWire в некотором смысле напоминает змея уробороса, кусающего самого себя за хвост.

Рис. 86. Изображение уробороса в алхимическом трактате 1478 г., автор Феодор Пелеканос (*греч.* Θεόδωρος Πελεκάνος)

Коннектомика сегодня 4.2.7

Чего не могу воссоздать, того не понимаю.

Ричард Фейнман

EyeWire не единственный из современных проектов, посвящённых развитию технологий для создания моделей коннектомов живых существ (напоминаем, что коннектом — это карта связей нейронов в нервной ткани).

Второго апреля 2013 г. администрация Президента США дала старт амбициозной частно-государственной исследовательской программе BRAIN Initiative (Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies, Исследование мозга через продвижение инновационных нейротехнологий),

глобальной целью которой является достижение динамического понимания принципов работы мозга. Инициатива была разработана Управлением по научной и технологической политике (Office of Science and Technology Policy, OSTP) в рамках более широкой программы Neuroscience Initiative (Инициативы нейронауки) *. Созданная под впечатлением от проекта «Геном человека» (Human Genome Project) BRAIN Initiative среди своих публичных целей заявляет помощь исследователям в деле изучения мозговых расстройств, таких как болезни Альцгеймера и Паркинсона, депрессии и травматических поражений мозга.

Первым кирпичиком в фундаменте BRAIN Initiative стала статья Павлоса (Пола) Аливизатоса из Калифорнийского университета в Беркли и его коллег, вышедшая на страницах престижного журнала *Neuron* под названием «Проект карты активности мозга и проблема функциональной коннектомики» (The Brain Activity Map Project and the Challenge of Functional Connectomics) за год до старта проекта. В статье были изложены экспериментальные планы для более скромного проекта, в том числе рассмотрены методы, которые могут быть использованы для построения «функционального коннектома», а также перечислены технологии, которые необходимо будет разработать в ходе проекта. Авторы указывают, что первоначальные исследования могут

* Нейронаука — междисциплинарная область знаний, занимающаяся изучением нейронных процессов.

быть проведены на излюбленных объектах исследователей — нематодах *Caenorhabditis elegans*, затем на плодовых мушках *Drosophila melanogaster* — обладателях сравнительно простых нервных систем. На следующем этапе исследований предлагалось перейти к рыбкам *Danio rerio* (известных в англоязычной литературе под именем Zebrafish — рыба-зебра), мышам и (ВНЕЗАПНО!) этрусской землеройке (она же карликовая многозубка)[995].

Кстати сказать, эта чудесная многозубка — самое маленькое по массе тела из известных науке млекопитающих (если брать в качестве критерия длину тела, то свиноносая летучая мышь оказывается всё же немного покороче), а её мозг состоит из всего примерно миллиона нейронов. Сердечко этрусской землеройки бьётся с частотой до 1511 ударов в минуту[996]. А с какой частотой билось бы твоё сердце, %USERNAME%, если бы ты узнал, что учёные хотят нарезать твой мозг на тонкие ломтики?

От землероек можно будет перейти к приматам, в том числе — на последнем этапе — к людям. Среди технологий, предлагаемых для разработки авторами статьи: наночастицы, которые могли бы использоваться в качестве датчиков, способных определять потенциалы действия в отдельных нейронах; нанозонды, которые могли бы служить в качестве электрофизиологических многоэлектродных массивов; многообещающие методы, основанные на синтетической биологии, и множество других прекрасных гитик[997].

Интересен мультидисциплинарный состав авторов этого своеобразного манифеста. Аливизатос — химик и пионер в области развития наноматериалов, Миянг Чунь — биохимик, Джордж Чёрч — генетик, химик и молекулярный инженер, Ральф Гринспен и Рафаэль Юст — нейробиологи, Майкл Рукс — физик.

Что сделано сегодня из обозначенного в статье 2012-го? Не так уж мало.

Первый коннектом живого существа, а именно нематоды *C. elegans*, был построен в далёком 1986 г. группой исследователей во главе с биологом Сидни Бреннером из Кембриджа. Бреннер и его коллеги аккуратно нарезали миллиметровых червей на тонкие ломтики и сфотографировали каждый срез с помощью плёночной камеры, установленной на электронном микроскопе, а затем по полученным снимкам вручную проследили все связи между нейронами[998]. Однако у *C. elegans* всего 302 нейрона и около 7600 синапсов. В 2016 г. команда учёных из Университета Дэлхаузи в Канаде повторила подвиг своих коллег для личинки морского оболочника *Ciona intestinalis*, центральная нервная система которого, как выяснилось, состояла из 177 нейронов и 6618 синаптических соединений[999]. Однако надо заметить, что методы, используемые для построения коннектома, неэффективны для крупных нервных систем. Исследователи не задумывались всерьёз о том, чтобы приступить к осуществлению значительно более крупных проектов до 2004 г., когда физик Винфрид Денк и нейроанатом Хайнц Хорстманн из Института медицинских исследований Общества Макса Планка предложили новый метод, основанный на использовании автоматического микроскопа для

разрезания и визуализации мозга, а также специализированного программного обеспечения для сбора и соединения результирующих изображений [1000].

В 2019 г. в журнале *Nature* появилась публикация доктора Скотта Эммонса и его коллег из Медицинского колледжа Альберта Эйнштейна (Albert Einstein College of Medicine) с подробным отчётом о воссоздании коннектома обоих полов (гермафродита и самца) нематоды *C. elegans* при помощи вышеуказанного метода [1001]. Годом раньше группа учёных под руководством Чжихао Чжэна из Принстонского университета завершила работу над сканированием мозга дрозофилы, состоящего из примерно 100 000 нейронов. Система, разработанная Чжэном и его коллегами, позволила пропустить через просвечивающий растровый электронный микроскоп более 7000 тончайших срезов мозга мушки, толщина каждого из которых составляла порядка 40 нм, а суммарный размер полученных в результате изображений составил 40 трлн пикселей [1002, 1003].

Пятого августа 2019 г. команда, в которую, помимо Чжэна, входили специалисты из исследовательской группы Connectomics компании Google, а также их коллеги из Медицинского института Говарда Хьюза (HHMI) и Кембриджского университета, опубликовала основанную на собранных годом ранее данных работу «Автоматическая реконструкция мозга дрозофилы на базе электронной микроскопии последовательных сечений с помощью закрашивающих сетей и локальной коррекции выравнивания» (Automated Reconstruction of a Serial-Section EM *Drosophila* Brain with Flood-Filling Networks and Local Realignment), в которой демонстрируется метод, способный с использованием нейросетевой модели автоматически воссоздавать объёмную карту связей нейронов [1004]. Запись в блоге Google AI, опубликованная за год до выхода статьи, посвящённой реконструкции мозга дрозофилы, показывает работу алгоритма на примере мозга зебровой амадины (*Taeniopygia guttata*) [1005], которая по-английски называется Zebra finch. Быть может, какой-то стажёр из Google перепутал Zebrafish с Zebra finch, а в эти минуты уже подкрадывается с микротомом к кубинскому щелезубу, перепутав его с карликовой многозубкой?

Рис. 87. Карликовая многозубка (*лат.* Suncus etruscus)

В апреле 2019 г. сотрудники Алленовского института головного мозга в Сиэтле отпраздновали преодоление последнего рубежа в проекте по картированию одного кубического миллиметра мозга мыши с его 100 000 нейронов и одним миллиардом связей между ними. Чтобы обработать образец размером с горчичное зёрнышко, микроскопы работали непрерывно в течение пяти месяцев, собрав более 100 млн изображений 25 000 срезов зрительной коры. Затем программному обеспечению, разработанному учёными института, потребовалось около трёх месяцев, чтобы объединить изображения в единый трёхмерный массив объёмом 2 петабайта (т. е. 2 млн гигабайт). Все собранные более чем за тридцать лет миссиями Landsat снимки нашей планеты занимают всего около 1,3 петабайта, что делает сканы мозга мыши практически «целым миром в песчинке», говорит нейробиолог Клэй Рэйд, обыгрывая слова английского поэта Уильяма Блейка [To see a World in a Grain of Sand].

Первого июня 2021 г. в исследовательском блоге компании Google появилось сообщение[1006], что её исследователи совместно с коллегами из Лаборатории Лихтмана (Lichtman Laboratory) в Гарвардском университете опубликовали датасет под названием H01. Этот набор данных объёмом 1,4 петабайта содержит информацию о небольшом фрагменте коры головного мозга человека. Ряд технических подробностей можно узнать из сопроводительной статьи под названием «Коннектомное исследование петамасштабного фрагмента коры мозга человека» (A connectomic study of a petascale fragment of human cerebral cortex)[1007], вышедшей днём ранее на сайте препринтов bioRxiv.

В ходе хирургической операции из височной доли коры головного мозга 45-летней пациентки, страдающей от устойчивой к медикаментам эпилепсии, был извлечён положенный в основу исследования фрагмент ткани объёмом около кубического миллиметра. При помощи микротома этот фрагмент был разделён более чем на 5000 срезов толщиной 30 нм, а затем обработан многолучевым сканирующим электронным микроскопом с разрешением 4 × 4 нм. После этого полученные данные были превращены в трёхмерную модель при помощи уже ранее знакомых нам закрашивающих сетей (Flood-Filling Networks, FFNs) и вспомогательных вычислительных моделей. Полученный датасет содержит детальные сведения о 50 000 клеток, сотнях миллионов их отростков (авторы статьи употребляют термин «нейриты» — собирательное понятие для аксонов и дендритов) и примерно 130 млн синапсов. На сегодняшний день H01 является крупнейшим размеченным набором данных, описывающим образец мозговой ткани человека.

Ознакомиться с данными можно в обычном браузере при помощи специального интерфейса, получившего название Neuroglancer (дословно: нейронаблюдатель)[1008].

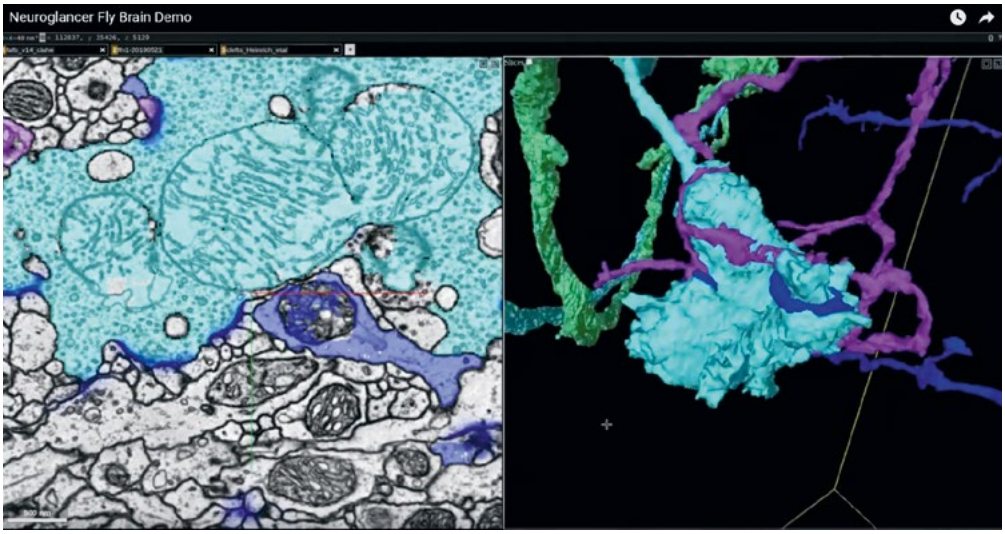


Рис. 88. Трёхмерная модель мозга в Neuroglancer

Ещё одним важным результатом, полученным в последнее десятилетие, стало создание трёхмерной модели синапса в атомарном разрешении, включающей около 300 000 молекул, принадлежащих к 60 различным белкам[1009, 1010].

Хотя в ходе упомянутых исследований и достигнут несомненный прогресс, конечная цель — наноразмерный коннектом человеческого мозга — пока ещё далеко. Число нейронов в нём сопоставимо с количеством звёзд в Млечном Пути (порядка 10^{11}). При использовании современной технологии обработки изображений потребуются десятки микроскопов, работающих круглосуточно на протяжении тысячи лет, чтобы собрать данные, необходимые для достижения конечной цели.

Удивительно, что лишь недавно удалось обнаружить некоторые новые типы клеток мозга, а также уточнить функции известных ранее клеток. Например, в 2015 г. учёные из Федеральной политехнической школы Лозанны (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) разработали количественную модель ранее неизвестной взаимосвязи между астроцитами * и нейронами[1011]. А в 2023 г. учёным из Лозаннского университета (Université de Lausanne) удалось обнаружить новую разновидность специализированных астроцитов, участвующих в переносе одного из нейромедиаторов — глутаминовой кислоты (глутамата)[1012]. Словом, в 2020-е гг. рубрика «Новости анатомии» всё ещё не является курьёзным анахронизмом.

Но достижения в области микроскопии, а также разработка более мощных компьютеров и алгоритмов для анализа изображений продвинули

* Астроцит (от греч. ἄστρον — звезда и κύτος — клетка) — тип нейроглиальной клетки звёздчатой формы с многочисленными отростками.

область коннектомики вперёд столь быстро, что это удивляет и самих исследователей. *«Пять лет назад было слишком амбициозно думать о кубическом миллиметре»*, — говорил Рэйд в 2019 г. Сегодня многие исследователи считают, что полное картирование мозга мыши, объём которого составляет около 500 кубических миллиметров, станет возможным уже в этом десятилетии. *«Сегодня картирование человеческого мозга на синаптическом уровне может показаться невероятным. Но если прогресс в вычислительных мощностях и в научных методах будет идти вперёд теми же темпами, ещё одно тысячекратное увеличение возможностей уже не кажется нам немыслимым»* [1013].

BRAIN Initiative — не единственная масштабная программа в этой области. Созданием функциональной модели мозга крысы (с прицелом на мозг человека) заняты и учёные из проектов Blue Brain Project и Human Brain Project. Не стоит на месте и China Brain Project. Пожалуй, при взгляде со стороны сегодняшние усилия в области моделирования мозга напоминают космическую гонку середины XX в.

4.3 История первой модели искусственного нейрона: Мак-Каллок и Питтс

> — Да, видите, папенька, — сказал Миша, протирая глазки, — мне всё хотелось узнать, отчего музыка в табакерке играет; вот я принялся на неё прилежно смотреть и разбирать, что в ней движется и отчего движется; думал-думал и стал уже добираться, как вдруг, смотрю, дверца в табакерке растворилась…
>
> Одоевский В. Ф. *Городок в табакерке*

Но вернёмся в суровую действительность первой половины XX в. Учёные, ставившие перед собой цель создать системы для автоматизации решения интеллектуальных задач, не могли ждать появления биологически достоверных моделей мозга. Только сегодня мы располагаем достаточными знаниями и вычислительными мощностями для того, чтобы попытаться на клеточном уровне симулировать работу нервной системы сравнительно простых живых организмов, таких как, например, нематоды *C. elegans* (в проектах OpenWorm[1014] и Worminator[1015]) или головастика[1016, 1017]. Если бы пионеры авиации ждали появления биологически достоверных моделей птиц, самолёты и сегодня оставались бы лишь мечтой.

Поиск разумного компромисса между биологической достоверностью моделей и их практической применимостью начался параллельно с созданием первых электронно-вычислительных машин. Истоком исследовательского направления, связанного с применением искусственных нейронных (или, как выражались сами авторы, «нервных») сетей, стала пионерская работа[1018] Уоррена Мак-Каллока и Уолтера Питтса, написанная ими в 1943 г. (эту статью под заголовком «Логическое исчисление идей, имманентных нервной деятельности» (A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity), вышедшую в «Бюллетене математической биофизики» (Bulletin of Mathematical Biophysics), я буду далее по тексту называть просто «статьёй Мак-Каллока и Питтса 1943 г.»). Но, как и в случае с другими трудами, закладывающими основы того или иного направления, работа Мак-Каллока и Питтса появилась не на ровном месте, что становится ясно после знакомства со средой, в которой работали авторы. А история их жизни и творчества весьма поучительна.

Учёный, беспризорник и иммигрант 4.3.1

Уоррен Мак-Каллок родился в Оранже (штат Нью-Джерси, США) 16 ноября 1898 г., в семье Джеймса Мак-Каллока и его жены Мэри Мак-Каллок (Брэдли). Джеймс Мак-Каллок был бизнесменом, собственноручно сколотившим состояние. Он управлял крупным бизнесом, имевшим доли в железнодорожных и горнодобывающих предприятиях. Мать Уоррена была религиозной женщиной, активно участвовавшей в жизни епископальной церкви. Помимо Уоррена, в семье было ещё двое детей: младшая сестра Уоррена Маргарет и его сводный старший брат. Лето семья часто проводила на острове Нантакет у Кейп-Кода, где Уоррен учился плавать и грезил о приключенческом мире кораблей и китобойных капитанов. В 1917 г. он поступил в квакерский колледж в Хаверфорде с намерением стать священником, в соответствии с пожеланиями своей семьи, однако вскоре его привлекли философия и математика (надежды родителей в этом отношении оправдала лишь сестра Уоррена, которая посвятила жизнь религии и стала активной участницей квакерской общины и пацифисткой). Уоррен искал понимания того, кем мы являемся, причём его интересовали не религиозные воззрения, а конкретные механизмы. По его словам, *«наконец, мы учимся признавать собственное невежество, избегать суждений и отказываться от объяснения ignoti per ignotium [неизвестных через ещё более неизвестное] — „бога“, который показал себя в этом деле столь же бесполезным, как и всё мирское. Вместо этого мы ищем механизмы…»*[1019].

Поиск механизмов работы мозга, раскрывающих суть процессов познания, в конечном итоге и стал центральной темой в работе Мак-Каллока.

Окончив колледж в Хаверфорде, Мак-Каллок посвятил себя изучению философии, психологии и «экспериментальной эстетики» в стенах Йельского университета, где в 1921 г. получил степень бакалавра искусств. Двумя годами позже, уже в Колумбийском университете, он получает степень магистра. Следующим этапом в образовании юноши становится звание доктора медицины, полученное Мак-Каллоком в 1927 г. в Колледже врачей и хирургов всё того же Колумбийского университета. После семилетней стажировки в Госпитальном центре Бельвю (Bellevue Hospital Center) в Нью-Йорке Мак-Каллок возвращается в Йельский университет, где с 1934 по 1941 г. работает в Лаборатории нейрофизиологии, а потом переходит на факультет психиатрии Иллинойсского университета в Чикаго (University of Illinois at Chicago).

У его молодого соавтора, Уолтера Питтса, судьба была более сложной — отец Питтса был простым водопроводчиком и часто избивал сына, в итоге мальчик сбегал из дома и фактически жил на улице. Однажды, спасаясь от преследования хулиганов, Уолтер спрятался в библиотеке, среди стеллажей, на которых хранились книги по математике. Там он наткнулся на книгу «Принципы математики» (Principia Mathematica) Бертрана Рассела и Альфреда Уайтхеда, которая всерьёз увлекла мальчика. Он провёл в библиотеке

целую неделю, за которую внимательно изучил все три тома. Затем Уолтер написал критический отзыв на один из больших разделов первого тома и отослал его в Англию Расселу. Реакция учёного была весьма положительной: он отправил Питтсу ответ, в котором пригласил его учиться в аспирантуре в Кембридже. Здесь нужно отметить, что в ту пору Питтсу было всего 12 лет, так что, к сожалению, он не мог принять приглашение Рассела[1020]. Однако три года спустя, когда 15-летний подросток узнал, что осенью 1938 г. Рассел начинает читать лекции в Чикагском университете (University of Chicago) в качестве приглашённого профессора, он навсегда сбежал из дома и отправился в Чикаго[1021].

Рассел направил Питтса к Рудольфу Карнапу, одному из активных членов Венского кружка *, недавно приехавшему в Америку из Австрии и обосновавшемуся в университете. Этой же осенью, не имея ещё диплома об окончании средней школы, Уолтер стал неофициальным студентом Чикагского университета. Джером Летвин, близкий друг Питтса и будущий соавтор многих его исследований, позже вспоминал начало учёбы последнего: *«Уолтер время от времени посещал занятия. У него не было денег, поэтому он не мог быть зачислен официально. Он был бездомным беспризорником и обитал в утлой комнатёнке за четыре доллара в неделю, но его быстро признали „странным вундеркиндом“ и выделили небольшую стипендию от университета»*.

Знакомство Питтса с Карнапом напоминало знакомство с Расселом. *«Карнап только что написал книгу по логике* (здесь имеется в виду книга „Логический синтаксис языка“, написанная Карнапом в 1934 г. и опубликованная на английском языке в 1937 г.[1022] — *С. М.*), *и Уолтер принёс свой экземпляр с письменными аннотациями, указывающими на то, что он считал несколькими серьёзными дефектами,* — сообщил Летвин, оказавшийся свидетелем произошедшего. — *Он [Питтс] вошёл в кабинет Карнапа с книгой и безо всякого представления начал задавать вопросы. Карнап был в восторге».* Пробыв некоторое время учеником Карнапа и освоив его сложную для понимания символьную нотацию, Питтс был заинтригован исследованиями другого выдающегося преподавателя университета — Николая Рашевского, отца-основателя математической биофизики, стремившегося перестроить биологию на базе физических наук с использованием новых передовых инструментов математической логики[1023].

Исследования Рашевского оказали огромное влияние на дальнейшие исследования нейронных сетей, причём как напрямую, так и через Питтса. Как позднее вспоминал Летвин, факультет Рашевского был единственным, который Питтс считал своим домом[1024]. Тем более удивительно, что биографические сведения о Рашевском крайне скудны, а в отечественной литературе его имя почти не упоминается. Отчасти виноват в этом сам Рашевский, который был твёрдо убеждён, что *«единственное, что стоит знать о человеке*

* Венский кружок (нем. *Wiener Kreis*) — группа учёных, регулярно собиравшаяся в Вене в конце 20-х — середине 30-х гг. XX в. С деятельностью Венского кружка обычно связывают появление логического позитивизма.

науки, — это его научная работа и научные публикации». Именно поэтому архив учёного почти не содержит материалов о его личной жизни. Кроме того, непростой жизненный опыт Рашевского привёл его к убеждению в том, что *«учёный должен держаться подальше от любой политики»* (такую же позицию он занимал и в отношении религии)[1025]. И всё же мы позволим себе дерзость не согласиться с мнением этого великого человека и приоткроем завесу тайны, скрывающую от нас подробности его жизни.

Николай Рашевский родился в 1899 г. в Чернигове в семье сахарозаводчика Петра и Надежды Рашевских. Мать мальчика рано умерла, и отец женился повторно, при этом у мачехи Николая уже было двое детей от первого брака. Вся большая семья поселилась в просторном красивом доме Рашевских, расположенном на северной окраине Чернигова в урочище Черниговская Швейцаровка (Рашевщина)[1026, 1027]. Во втором браке Петра Рашевского родилось ещё двое детей.

Будучи ребёнком из богатой семьи, Николай получил хорошее образование. Он владел латинским, английским, немецким и французским языками, хорошо разбирался в русской литературе и благодаря безупречной памяти мог цитировать наизусть целые страницы русских и греческих классиков[1028].

С самого детства Николай был увлечён наукой и стремился к научной карьере. Весной 1915 г. он ушёл из шестого класса частной гимназии В. П. Науменко, а весной 1916 г. сдал экстерном в Черниговской гимназии экзамен на аттестат зрелости. В том же году он поступил в Императорский университет Святого Владимира в Киеве и с жаром принялся за работу в лаборатории профессора Косоногова — выдающегося физика, специалиста в области электрических и оптических явлений. После некоторых колебаний Рашевский пришёл к выводу, что среди всех областей физики его более всего интересует теория электромагнитного поля и связанные с ней вопросы. Весной 1918 г. юноша закончил свою первую научную работу — «К вопросу о фотомагнетизме», а летом следующего года представил Киевскому физико-математическому обществу работу под названием «К вопросу о дифракции рентгеновых лучей в псевдоаморфных телах», посвящённую исследованию кристаллической структуры веществ рентгеновскими лучами. В 1919 г. Рашевский параллельно с учёбой работал в Комиссии по изучению производительных сил под председательством академика Владимира Ивановича Вернадского.

Но в жизнь юноши внесла коррективы Гражданская война: осенью того же года, будучи студентом четвёртого курса, Рашевский отправился в Крым, чтобы поступить добровольцем в Белый Черноморский флот. Он получает нижний чин на миноносце «Жаркий», однако на смену первоначальному энтузиазму быстро приходит разочарование. Тоска по науке вынуждает юношу написать письмо Вернадскому (который в тот момент также был в Крыму — на позиции ректора Таврического университета) с просьбой прикомандировать его к Таврическому университету, чтобы продолжить свои исследования, пусть и в условиях скудности лабораторных средств[1029].

Вернадский, откликнувшись на просьбу Рашевского, пишет письмо барону Врангелю с просьбой прикомандировать к Таврическому университету двух талантливых студентов, находящихся на военной службе: Николая Рашевского и Отто Струве[1030], ставшего впоследствии одним из крупнейших астрофизиков XX в.

В 1920 г. Николай женится на Эмилии Золотарёвой, с которой он познакомился в киевском университете. Эмилия Ивановна также изучала физику и стала в будущем соавтором ряда совместных с мужем экспериментов в области биофизики. В одной из биографических работ, посвящённых Рашевскому, Эмилия Ивановна названа «осиротевшей княжной из Владикавказа» [an orphaned princess from Vladekavkaz][1031] (sic!), в других источниках она именуется просто «княжной с Кавказа» [princess from the Caucasus][1032], а в третьих она и вовсе «графиня Эмилия» [Countess Emily][1033]. В действительности Эмилия Ивановна была дочерью офицера со Ставрополья Ивана Васильевича Золотарёва, к концу карьеры дослужившегося до генеральского звания.

В том же 1920 г., после окончательного поражения Белой армии, Николай с женой и его родители со своей большой семьёй покидают Россию. Их первым эмигрантским пристанищем становится Константинополь, где Николай устраивается преподавателем на физическом факультете Американского колледжа Роберта (İstanbul Özel Amerikan Robert Lisesi или Robert Kolej). Однако разорённая послевоенная Турция, наводнённая русскими эмигрантами, оказалась не слишком подходящим местом для научной работы, поэтому в 1921 г. Рашевские перебираются в Прагу[1034].

В течение трёх лет Рашевский работал в Пражском университете на кафедре русистики и в Пражском политехническом институте, где читал лекции по термодинамике и теории электричества. Работы, опубликованные Рашевским в эти годы, относятся к области фотомагнетизма, дифракции рентгеновских лучей на псевдоаморфных телах, а также электродинамики и теории относительности. Большая их часть вышла на немецком языке в научном журнале *Zeitschrift für Physik* [Журнал о физике]. Лишь одна работа была опубликована на английском языке в престижном издании *Physical Review*.

Все эти годы Рашевский ищет возможности перебраться в США. На фоне Европы, разорённой войной и переживающей череду революционных потрясений, Соединённые Штаты выглядели для учёных островком стабильности и относительного благополучия. Но для того, чтобы перебраться через Атлантику, нужны были немалые средства и уверенность в том, что на новом месте удастся получить работу. Ни того ни другого у Рашевских не было.

В апреле 1924 г. Рашевскому, благодаря помощи некоторых друзей, удалось добиться внесения своего имени в лист ожидания на должность инженера-исследователя в исследовательских лабораториях Westinghouse Electric в Питтсбурге (штат Пенсильвания). Этого было достаточно для получения визы в США. Место в списке и средства на поездку удалось получить благодаря опять же помощи друзей и коллег, а также гуманитарной организации «Русский студенческий фонд» (Russian Student Fund).

Но на этом трудности, с которыми пришлось столкнуться Рашевским, не закончились. Первоначальный план эмиграции всей семьёй провалился, поскольку Рашевский не смог получить визы для жены и двух дочерей: трёхлетней Эмили и годовалой Нины. Поэтому 1 июля 1924 г. Рашевский поднялся на борт океанского лайнера в одиночку, надеясь получить визы для своей семьи уже в США. По прибытии он был подвергнут проверке со стороны административного иммиграционного комитета (Board of Special Inquiry, BSI), которую удалось пройти только благодаря связям в США.

Ожидая вестей от Westinghouse Electric, Рашевский получил приглашение прочитать курс лекций в Колледже Вашингтон-сквер Нью-Йоркского университета (Washington Square College, New York University). В это время его жена с детьми перебралась в Париж, где задержалась на несколько месяцев, пока не удалось договориться об их приезде в Соединённые Штаты[1035].

В университете Рашевский читал лекции по теории относительности и опубликовал в *Scientific American* статью[1036] о «четвёртом измерении». Журнал *Current Opinion* [Общее мнение] за 1924-й сообщает[1037], что Рашевский совместно с физиком Харольдом Шелдоном планируют попытку воспроизвести в американской лаборатории нашумевший эксперимент немецкого учёного Адольфа Мите (одного из пионеров цветной фотографии), в ходе которого Мите якобы обнаружил, что из паров ртути под воздействием ультрафиолетового излучения образуются золото и серебро. Мы не знаем, что именно произошло в ходе совместных экспериментов, но именно из-за разногласий с Шелдоном Рашевскому пришлось в декабре 1924 г. покинуть университет.

К счастью, компания Westinghouse Electric наконец-то предложила ему должность физика-исследователя, благодаря которой Рашевский получил возможность обеспечивать семью и продолжать занятия наукой. Параллельно с работой в Westinghouse Electric Рашевский читал лекции по теории относительности на физическом факультете Питтсбургского университета, а также занимался переводами научных статей с немецкого и русского языков. Тем не менее он продолжал искать постоянную позицию в академической сфере, чтобы иметь возможность уделять больше времени чистой науке и преподаванию.

Во время работы в Westinghouse Electric Рашевский занимался преимущественно проблемами промышленной физики. Большая часть работ, опубликованных им в это время, относится к изучению дисперсных систем*, а именно динамики коллоидных частиц. Причина, по которой Рашевский занимался коллоидными частицами, была проста — компанию интересовали свойства красителей и клеев, применяемых в промышленности[1038].

* Дисперсными называют системы, состоящие как минимум из двух фаз, одна из которых мелко раздроблена и равномерно распределена во второй, сплошной фазе. В зависимости от размера частиц дисперсной фазы выделяют грубодисперсные (с размером частиц больше 100 нм) и тонкодисперсные (с размером частиц от 1 до 100 нм), или коллоидные, системы. Если же размер частиц дисперсной фазы становится меньше 1 нм, то система становится раствором.

Рашевский исследовал процесс, при котором увеличение капель приводило к их нестабильности и последующему распаду на более мелкие. На одном из мероприятий он поинтересовался у биолога из Питтсбургского университета, сходен ли процесс разделения капель с процессом деления живых клеток. Каково же было его удивление, когда в ответ он услышал, что *«(1) никто не знает, как делятся биологические клетки, и, более того, (2) никто не может знать, как делятся биологические клетки, потому что это биология»*[1039]. Рашевский был возмущён таким заявлением и решил попытаться объяснить процесс деления клеток с помощью системы дифференциальных уравнений. По всей видимости, именно с этого и началась главная научная работа в жизни Рашевского — его смелый и, даже можно сказать, донкихотский проект по созданию математической биофизики. В 1950 г. Эндрю Хаксли, вспоминая об этом, сказал, что Рашевский *«в широком диапазоне пытался создать синтез, для которого [в то время] не существовало адекватной экспериментальной основы»*.

В 1934 г. Рашевский меняет место в Westinghouse Electric на постоянную работу на кафедре физиологии Чикагского университета. В ту пору кафедру возглавлял известный учёный-физиолог Аякс Карлсон, с которым у Рашевского быстро возникли методологические разногласия.

Рашевский описывал свою методологию следующим образом: *«Сначала изучение… чрезмерно упрощённых примеров, которые, возможно, даже не имеют аналогов в реальности»*, и лишь затем изучение «реалистичных» примеров. Упрощение использовалось для прогнозирования тенденций, а не вычисления точных значений. Рашевский полагал, что такая методология поможет увидеть всю сложность биологических явлений и сделать их предметом «точной науки»[1040]. Такой подход, напоминающий анекдот про «сферического коня в вакууме» *, не вызывал особого восторга у биологов. Профессор Джек Коуэн, будущий преемник Рашевского на посту председателя Комитета по математической биологии в Чикагском университете, рассказал в одном из своих интервью такую историю: *«Аякс Карлсон, который был весьма известным физиологом, выставил его [Рашевского] через год, потому что тот не провёл ни одного эксперимента. Рассказывают, что однажды Карлсон вошёл в кабинет Рашевского, где были письменный стол, стул и Рашевский, сидящий за столом с карандашом в руке. Карлсон спросил: „Где ваш аппарат?“ [Where is your apparatus?], на что Рашевский ответил с русским акцентом: „Какой аппарат? Я математический биолог“ [What apparatus? I am a mathematical biologist]. В итоге Рашевский был выставлен вон»*[1041].

* Один из вариантов этого анекдота: «Собрали биолога, математика и физика и попросили их придумать что-нибудь, чтобы всегда выигрывать на бегах. Через год учёные рассказывают о своих достижениях.

Биолог: Зная точную родословную лошади, успехи её родителей, чем её кормили, как лечили, я могу точно назвать максимальную скорость.

Математик: Имея точные статистические данные предыдущих забегов этих лошадей, я могу назвать приблизительные результаты этого.

Физик: Мне нужно ещё десять лет, пятьдесят миллионов долларов, несколько помощников и лаборатория, но я уже построил модель движения сферического коня в вакууме».

К счастью, разногласия с Карлсоном не привели к увольнению Рашевского из университета, он лишь был вынужден перейти на кафедру психологии. А в 1938 г. Рашевскому удалось убедить администрацию университета создать отдельное подразделение — секцию по математической биофизике (Section of Mathematical Biophysics). В 1939 г. при активной поддержке Уоррена Уивера из фонда Рокфеллера Рашевский основал научный журнал — уже упомянутый нами «Бюллетень математической биофизики», в котором впервые была опубликована революционная работа Мак-Каллока и Питтса[1042].

Ещё в начале 1930-х гг. Рашевский опубликовал несколько работ по математической теории нервной проводимости, основанных на собственных исследованиях в области цитологии (раздел биологии, изучающий живые клетки). В 1933 г. он представил детальную теорию нервного возбуждения и торможения, основанную на понятии диффундирующих веществ и электрохимических градиентов. Рашевский начал с обзора предыдущих теорий, разбив их на две группы. Первая группа включала теории Вальтера Нернста и Арчибальда Хилла. В 1910 г. Хилл представил гипотезы, основанные на взглядах Нернста на природу нервного возбуждения, и сравнил результаты расчётов с экспериментальными данными. Эти теории, утверждал Рашевский, начинались с определённых предположений о роли ионов, их распределении и движении в электрическом поле. Хилл и Нернст предположили, что для нервного возбуждения необходима критическая концентрация ионов, и вывели формулы, позволяющие рассчитать необходимую силу тока и продолжительность электрической стимуляции. Вторая группа теорий (в неё входили теории Хорвега и Лапика), по мнению Рашевского, демонстрировала «феноменологический метод», поскольку эти теории устанавливали математические закономерности без попыток их физической интерпретации[1043].

Фактически Рашевский стал пионером в области математического моделирования биологических нейронов, и его подход заключался в попытке использовать дифференциальные уравнения для описания процессов возбуждения и торможения. Интересно, что уравнения, найденные Рашевским, были несколько позже независимо получены и Арчибальдом Хиллом. Впрочем, Рашевского и Хилла, по всей видимости, мало интересовали вопросы моделирования процесса мышления, поэтому достроить первый мостик между нейрофизиологией и логикой было суждено не им. И именно в тот момент, когда науке предстояло сделать последний решительный шаг в этом направлении, в неё и оказался вовлечён молодой Уолтер Питтс.

К 1941 г. Питтс уже поглотил значительную часть содержимого университетских библиотек и большую часть учебной программы. Юноша выглядел тихоней, но в его характере проявлялись и озорные черты. *«Однажды Уолтер явился в аудиторию, в которой проходил экзамен в виде теста да/нет, —* вспоминал Летвин. *— Он уселся в первом ряду, подбрасывая монету и отмечая ответы, вновь подбрасывая и снова отмечая. Он получил наивысшую оценку в своей группе. Конечно, подбрасывание монеты было нужно только ради эффекта».* В 1941 г. Мак-Каллок перебрался в Иллинойсский университет

в Чикаго. Летвин, который в то время учился на врача, стал одним из первых, кто узнал об исследованиях мозга, проводимых в лаборатории Мак-Каллока. Познакомившись с Мак-Каллоком, Летвин вскоре представил ему Питтса.

Подобно Расселу, Карнапу и Рашевскому, Мак-Каллок мгновенно распознал гениальность Питтса и вскоре привлёк его к своему проекту по созданию логической модели мозга и нервной системы. Мак-Каллок проявлял персональное участие к молодым людям, входившим в его научный кружок. Он часто приглашал нуждающихся студентов к себе домой, где их радушно встречала семья Мак-Каллока — жена Рук и трое детей. В начале 1942 г. Питтс и Летвин перебрались в шумный дом Мак-Каллока на окраине Чикаго. Там, в ночной тиши, после того как собственные дети Мак-Каллока, которые были ненамного моложе Питтса, укладывались в постель, Мак-Каллок и Питтс занимались «взломом» логики нейронных сетей мозга. Неделями анализируя потоки сигналов по разветвлённым мозговым путям, они старались, по выражению Летвина, «понять, как мозг может функционировать так, чтобы быть механизмом, обеспечивающим существование психических процессов»[1044].

Первое, что бросалось в глаза тем, кто видел рядом Мак-Каллока и Питтса, — разительный контраст между ними. На момент их знакомства Мак-Каллоку было 42 года, он носил бороду, курил трубку, постоянно пил виски, любил поговорить о поэзии и философии, был обладателем выразительного лица, живой яркой мимики и буквально излучал уверенность. Питтс являл собой полную ему противоположность: небольшого роста, застенчивый восемнадцатилетний паренёк, чьи пухлые губы и неизменные очки на лице с высоким лбом и маленьким подбородком делали его похожим на умного утёнка.

4.3.2 «Мы знаем, как мы знаем»

Мак-Каллок объяснил Питтсу, что пытается смоделировать мозг при помощи логического исчисления Лейбница. Он черпал вдохновение в работе «Принципы математики» (Principia Mathematica), в которой Рассел и Уайтхед пытались показать, что вся математика может быть построена с нуля, на основе базовой, бесспорной логики. Их строительными блоками были высказывания — предложения, выражающие суждения, которые могли быть либо истинными, либо ложными. Авторы книги использовали базовые логические операции, такие как конъюнкция (операция «и»), дизъюнкция (операция «или») и отрицание (операция «не»), чтобы связывать высказывания во всё более усложняющиеся сети. Из базовых положений Рассел и Уайтхед выводили всё многообразие современной им математики.

Это привело Мак-Каллока к рассуждениям о нейронах. Он знал, что каждая из нервных клеток мозга порождает электрический импульс только

после достижения минимального порога напряжения: для этого импульсы соседних нервных клеток, передаваемые через синапсы, должны в сумме сформировать достаточную разность потенциалов на клеточной мембране нейрона. Мак-Каллок предположил, что эти процессы могут быть описаны при помощи двоичной логики: либо нейрон срабатывает, либо нет. Он пришёл к выводу, что сигнал нейрона является аналогом высказывания, а нейроны работают как логические элементы — принимая несколько значений на вход и формируя одно на выходе. А изменяя порог срабатывания нейрона, можно тем самым смоделировать операции «и», «или» и «не».

4.3.2

«Мы знаем, как мы знаем»

Глотком свежего воздуха для Мак-Каллока стала статья Тьюринга, в которой была предложена идея машины, способной рассчитать любую эффективно вычислимую функцию. Мак-Каллок пришёл к выводу, что мозг является именно такой машиной, использующей для вычислений закодированную в нейронных сетях логику. Нейроны, рассуждал он, могут быть связаны между собой логическими правилами для построения более сложных цепочек рассуждений подобно тому, как в «Принципах математики» из отдельных цепочек высказываний возводится здание математики.

Питтс сразу понял замысел Мак-Каллока, более того — он точно знал, какой математический инструментарий необходим для его воплощения в жизнь.

Дом Мак-Каллока в Хинсдейле, сельском пригороде на окраине Чикаго, был шумным пристанищем местной богемы. Чикагские интеллектуалы и литераторы постоянно приходили в гости к Мак-Каллоку, чтобы обсудить поэзию, психологию и политику. Тишина наступала лишь глубокой ночью, когда гости расходились по домам, а дети ложились спать. Именно в эти редкие тихие часы Мак-Каллок и Питтс, затаившись с бокалами виски, пытались построить вычислительный мозг из отдельного нейрона.

Перед тем как Питтс включился в работу, Мак-Каллок зашёл в тупик: ничто не мешало цепочкам нейронов формировать петли таким образом, что выход последнего нейрона в цепочке попадал на вход первого. Мак-Каллок не знал, как правильно математически описать эту ситуацию. С точки зрения логики петля похожа на парадокс: вывод становится предпосылкой, а следствие — причиной. Мак-Каллок пометил каждое звено в цепочке временно́й меткой, так что если первый нейрон сработал в момент времени t, то следующий срабатывал в момент времени $t + 1$ и так далее. Однако если цепь нейронов делала петлю, то момент времени $t + 1$ внезапно наступал раньше, чем t, и логика ломалась.

Питтс знал решение этой проблемы. Он использовал модульную арифметику (арифметические операции с остатками чисел по фиксированному модулю), которую можно проиллюстрировать на примере часов: если отсчитать 13 часов от 3 часов после полудня, то получится 4 часа утра следующего дня: $(3 + 13) \bmod 12 = 4$. Питтс показал Мак-Каллоку, что парадокс момента времени $t + 1$, предшествующего времени t, вовсе не является парадоксом, потому что

в подобных вычислениях время исключается из уравнения и понятия «до» и «после» утрачивают своё значение.

Если кто-то видит вспышку молнии на небе, то фоторецепторы в сетчатке его глаза посылают через цепочку нейронов сигнал в зрительную кору мозга. Начав с любого нейрона в цепи, можно проследить шаги сигнала и выяснить, как давно ударила молния, но только если эта цепочка не содержит петли. В таком случае информация, кодирующая разряд молнии, просто бесконечно ходит по кругу и не имеет уже никакого отношения ко времени, когда в действительности ударила молния. Она становится, как выразился Мак-Каллок, «идеей, извлечённой из времени». Иными словами, памятью.

К тому времени, когда Питтс закончил вычисления, они с Мак-Каллоком уже имели в руках механистическую модель разума, первое использование вычислений в применении к мозгу и первый аргумент в пользу того, что мозг по сути является устройством для обработки информации. Объединяя простые двоичные нейроны в цепочки и петли, Питтс и Мак-Каллок показали, что мозг может выполнять все возможные логические операции и произвести любые вычисления, доступные гипотетической машине Тьюринга. Петли (или циклы) подсказали им и способ, позволяющий мозгу выделять из информации фрагменты, формировать на их основе абстракции, сохранять, а затем таким же образом создавать новые абстракции уже на их основе. Так мозг формирует сложные и глубокие иерархии сохранённых идей в процессе, который мы называем мышлением.

Мак-Каллок и Питтс изложили свои выводы в новаторской статье «Логическое исчисление идей, присущее нервной деятельности» (A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity), опубликованной в «Бюллетене математической биофизики». Разумеется, их модель представляла биологический мозг в упрощённом виде, но она демонстрировала жизнеспособность предложенного подхода. *«Впервые в истории науки,* — заявил Мак-Каллок группе студентов-философов, — *мы знаем, как мы знаем»* [1045].

4.3.3 Удивительные приключения нейронных сетей в мире кибернетики: работа с Норбертом Винером

В конце 1920-х гг. семейство Мак-Каллок приобрело ранчо с фермой в Олд-Лайме (штат Коннектикут). Их первым предприятием на земле был летний лагерь для нуждающихся детей, который они называли «лагерь Аладдин» [1046]. В 1940-е гг. ферма Мак-Каллоков стала центром притяжения для интеллектуалов, учёных и академиков. Места здесь было предостаточно, чтобы гости могли переночевать у Мак-Каллоков или даже остаться на несколько дней. Одним из частых гостей фермы был Норберт Винер. Озеро, природа, поздние

беседы за напитками в течение целых выходных — всё это было расслабляющим противоядием для напряжённого ума Винера. На ферме царили либеральные порядки: такие вещи, как плавание в обнажённом виде в озере, были привычными как для хозяев, так и для гостей. Винера часто видели в полуобнажённом виде с сигарой в руке на берегу озера. Такова была беззаботная атмосфера ранчо Мак-Каллока.

Жена Винера Маргарет, в отличие от жён других гостей, никогда не сопровождала Норберта во время его поездок на ранчо. Эксцентричность Мак-Каллока в сочетании с его явно либеральными взглядами были неприемлемы с позиции консервативных пуританских взглядов Маргарет, она не скрывала отвращение к Уоррену с момента их первой встречи. Резюмируя своё жизненное кредо, она писала: *«Один из способов стать аристократом, если вы им не родились, — это отказаться от всех форм либерализма»*[1047]. Консерватизм взглядов Маргарет был весьма радикальным — она была довольно откровенной поклонницей взглядов Адольфа Гитлера и даже заставляла дочерей читать «Мою борьбу» (Mein Kampf). *«Однажды она сказала нам, что члены её семьи в Германии были сертифицированы как Judenrein (люди без еврейской примеси). Она думала, что нам будет приятно это узнать,* — вспоминала позже одна из их дочерей. — *Она сказала, что я не должна жалеть евреев Германии, потому что они были не очень хорошими людьми».* Как-то во время рождественской вечеринки Маргарет пыталась убедить гостей, что арийская родословная простирается до самого сына Божьего: *«Иисус был сыном немецкого наёмника, из числа расквартированных в Иерусалиме, и это было научно доказано»*. Довольно неловкая ситуация, принимая во внимание то, что её муж был евреем немецкого происхождения и, следовательно, её дочери были наполовину еврейками[1048].

Учитывая левые взгляды самого Винера, они с Маргарет были весьма странной парой. Винер женился по совету родителей, которые[1049], по всей видимости, считали, что такая женщина, как Маргарет, сможет позаботиться об их сыне, славившемся своей рассеянностью. Известный математик и историк математики Говард Ивс так вспоминал знакомство с Винером:

Впервые я столкнулся с ним в связи с собранием математиков, проходившим в Йельском университете в 1955 или 1956 году. В то время я был аспирантом в Гарварде. В те дни у профессоров были машины, а у студентов — нет. Кажется, сейчас всё обстоит ровным счётом наоборот. Мы с однокурсником узнали, что Винер поедет на встречу из MIT. Тогда мы дошли до MIT, который был расположен ниже по той же улице, что и Гарвард, и спросили его, можем ли мы поехать вместе на его машине? Винер был не против, и мы встретились с ним в условленное время. Дирк Ян Стройк и Винер сидели на переднем сиденье, а мы, двое студентов, уселись сзади. Это была самая страшная поездка, потому что автомобиль петлял от одной стороны дороги к другой, поскольку Винер, жестикулируя во время беседы со Стройком, почти не держал руки на руле. Удивительно, как мы не попали в аварию. В итоге мы приехали

немного раньше срока. <...> Мы зашли в маленький кафетерий, чтобы перекусить перед началом встречи. Закончив трапезу, мы подошли к вешалке, чтобы забрать свои плащи и шляпы, и, конечно, мы, студенты, с уважением отступили назад, чтобы позволить профессорам забрать свои вещи первыми. И Винер схватил мою шляпу. Он был обладателем довольно большой головы. Моя шляпа сидела на ней, как маленькая клоунская шляпка, и мы все рассмеялись. Винер, однако, ничего не заметил.

Поэтому я взял его шляпу и надел её, она опустилась мне до носа, и я посмотрел на него, подумав, что теперь-то он что-то заметит. Но Винер снова ничего не заметил, таким образом я и заполучил его шляпу для своего математического музея. Он ушёл с моей шляпой, а я пошёл домой с его. Собираясь в обратный путь, мы предпочли воспользоваться иным транспортом. Когда мы наконец возвратились в Кембридж (в повествовании про США под словом «Кембридж» имеется в виду пригород Бостона, в котором расположен Гарвардский университет и Массачусетский технологический институт. — *С. М.*) *и включили радио следующим утром, то услышали, что автомобиль профессора Винера был украден. Он, видимо, забыл, что приехал в Нью-Хейвен на машине, и вернулся обратно на автобусе. Собираясь утром на работу, он обнаружил, что гараж пуст, поэтому сообщил полиции, что кто-то украл его машину. Поэтому я был вынужден пойти туда и сказать им, что автомобиль припаркован на Мэйн-стрит в Нью-Хейвене*[1050].

Кстати говоря, другой участник этой забавной истории, Дирк Ян Стройк, также был весьма незаурядной личностью. Уроженец Нидерландов, Дирк Стройк в 23 года защитил диссертацию, а в 30 лет получил приглашение сразу от двух университетов — МГУ и MIT, сделав выбор в пользу последнего, где он затем работал вместе с Винером над проблемами дифференциальной геометрии. Стройк был стойким марксистом — вступив в Коммунистическую партию Нидерландов в 1919 г., он оставался её членом всю жизнь. На вопрос, по случаю своего 100-летнего юбилея, о том, как ему удаётся писать статьи в рецензируемые научные журналы в таком преклонном возрасте, Стройк ответил, что у него для этого есть все три «М», которые нужны мужчине: marriage (брак; жена Стройка, тоже математик, прожила почти 100 лет), mathematics (математика) и Marxism (марксизм)[1051, 1052].

Но вернёмся к Винеру и его знаменитой рассеянности. Ивс рассказывал и другие истории, дополняющие колоритный портрет основателя кибернетики. Например, однажды Винер, приехав на конференцию, оставил свою машину на парковке. Когда конференция закончилась, он обнаружил, что забыл место, где именно припарковался, и не помнил, как выглядела его машина. Поэтому он просто дождался, когда разъедутся все остальные автомобили, а затем забрал оставшуюся машину.

Когда Винер и его семья переехали в новый дом в нескольких кварталах от старого, жена снабдила его запиской, в которой содержались указания о том, как добраться до нового места. Однако когда Винер уходил с работы в конце

дня, то не смог вспомнить, куда именно он подевал эту записку, и, разумеется, не мог вспомнить, где находится его новый дом. Поэтому он поехал на старое место. Увидев маленькую девочку, он спросил её: «Девочка, можешь подсказать мне, куда переехали Винеры?» «Да, папочка, — ответила та, — мама сказала, что ты, вероятно, будешь здесь, поэтому прислала меня, чтобы показать тебе дорогу домой».

Однажды, сидя в холле кампуса, Винер был погружен в изучение газеты, лежавшей перед ним на столе. Несколько раз он вставал, делал несколько шагов, а затем вновь возвращался к газете. На его лице отражалось огромное усилие мысли. Он снова поднялся от своей газеты, сделал несколько быстрых шагов и столкнулся со студентом. Студент сказал ему: «Добрый день, профессор Винер!» Винер остановился, поднял глаза и, хлопнув себя ладонью по лбу, воскликнул: «Винер! Вот это слово!» — и побежал обратно к столу, чтобы вписать слово «винер» в кроссворд, разгадкой которого он был занят[1053].

Роберт Фано, ещё один коллега Винера, профессор электротехники и информатики в MIT, рассказывал, что однажды в конце беседы в институтском коридоре Винер спросил своего собеседника, в каком направлении он шёл, и, услышав ответ, сказал: «Хорошо! Это значит, что я уже пообедал».

Несколько выпускников MIT вспоминали, что во время своих странствий по залам института Винер обычно держался одной рукой за стену. По всей видимости, он использовал этот трюк для того, чтобы быть уверенным в том, что в конце концов найдёт дорогу обратно в корпус № 2.

Несмотря на всю свою рассеянность, Винер был обладателем исключительного и универсального ума. Веб-сайт музея MIT среди прочих воспоминаний современников о Винере приводит такую историю: Джей Болл рассказал, как сидел в кембриджской кофейне с китайским другом и пригласил Винера присоединиться к их столу. Винер обратился к другу на беглом путунхуа (mandarin, официальный стандарт китайского языка), а когда оказалось, что друг говорит только на кантонском диалекте, Винер легко перешёл на него. *«Мой отец свободно говорил на семнадцати языках,* — сказал он, — *но я глуп, поэтому могу говорить только на двенадцати»*[1054].

В 1943 г. Летвин привёл Питтса в кабинет Норберта Винера в Массачусетском технологическом институте. Винер безо всяких церемоний подвёл Питтса к доске, на которой выводил математическое доказательство, взял в руку мел и продолжил работу. Питтс включился в неё: стал задавать вопросы и выдвигать собственные предложения. По словам Летвина, когда они добрались до второй доски, стало ясно, что Винер нашёл себе нового помощника. Позже Винер напишет, что Питтс *«без сомнения был самым сильным молодым учёным из тех, кого я когда-либо встречал. <...> Я буду крайне удивлён, если он не окажется одним из двух или трёх самых важных учёных своего поколения, не только в Америке, но и во всём мире».*

Винер был так впечатлён, что пообещал Питтсу докторскую степень по математике в Массачусетском технологическом институте, несмотря на то что он так и не окончил среднюю школу (в то время как правила Чикагского

университета строго запрещали подобные вольности). Это было предложение, от которого Питтс не мог отказаться. К осени 1943 г. он переехал в кембриджскую квартиру, был зачислен в качестве специального студента в Массачусетский технологический и учился у одного из самых влиятельных учёных в мире. Воистину судьба завела его далеко от жизни работяг Детройта.

Винер хотел, чтобы Питтс сделал модель мозга более реалистичной. Дело в том, что, несмотря на прорыв, совершённый Мак-Каллоком и Питтсом, их работа не произвела сильного впечатления в среде нейрофизиологов: отчасти из-за того, что была полна сложной для понимания символьной логики, но также и потому, что столь грубая и упрощённая модель не отражала в полной мере хаотических нагромождений структуры биологического мозга. Винер, однако, понимал значение сделанного открытия и рассчитывал на то, что более реалистичная модель способна всё изменить. Но, что ещё важнее, он также понимал, что нейронные сети Питтса могут лечь в основу конструкции вычислительных машин, что возвещало эру кибернетической революции. Винер полагал, что если Питтс собирается создать реалистичную модель миллиардов взаимосвязанных нейронов мозга, то ему понадобится помощь статистики, а статистика и теория вероятностей были одними из основных областей знаний Винера. В конце концов именно Винер был тем учёным, кто дал математическое определение информации, связав её с вероятностью и энтропией.

Начав работу, Питтс быстро пришёл к выводу, что хотя наши гены и должны определять крупномасштабное строение мозга, но они никак не могут задавать каждую из триллионов синаптических связей: объём генетической информации, необходимой для этого, был бы слишком велик. Питтс предположил, что развитие человека начинается с практически случайных нейронных сетей, с большой вероятностью содержащих очень мало информации (тезис, который продолжает обсуждаться и в наши дни). Он подозревал, что в результате некоторого процесса изначально случайные пороги срабатывания нейронов со временем упорядочиваются, в результате чего происходит накопление информации.

Питтс решил смоделировать этот процесс с привлечением инструментов статистической механики. Винер взволнованно подбадривал его, понимая, что, если такая модель будет воплощена в машине, эта машина будет способна учиться.

«Теперь я понимаю семь восьмых того, что говорит Винер, что, как мне говорят, является чем-то вроде достижения», — писал Питтс в письме Мак-Каллоку в декабре 1943 г., примерно через три месяца после переезда. Его работа с Винером состояла в том, чтобы *«начать первое адекватное обсуждение статистической механики, понимаемой в самом общем смысле, что включает в себя, к примеру, проблему вывода психологических или статистических законов поведения из микроскопических законов нейрофизиологии… Разве это не звучит замечательно?»* [1055]

4.3.3

Удивительные приключения нейронных сетей в мире кибернетики: работа с Норбертом Винером

В январе 1945 г. Питтс принял участие в конференции в Принстоне, которую организовал Винер вместе с Говардом Эйкеном и фон Нейманом[1056]. Последний, познакомившись с Питтсом, был также весьма впечатлён его интеллектом. В итоге бывший беспризорник стал важнейшим участником группы кибернетиков. *«Никто из нас и не помышляет о публикации статьи без его исправлений и одобрения»*, — писал Мак-Каллок. *«[Питтс] однозначно был гением нашей группы*, — говорил Летвин. — *Он был абсолютно бесподобен в знании химии, физики, всего, что касалось истории, ботаники и так далее. Задавая ему вопрос, вы получали в ответ целый учебник… Для него весь мир был связан очень сложным и чудесным образом»*[1057].

Традиция конференций по кибернетике, подобных той, на которой оказался Питтс, берёт своё начало из двух встреч, на которых в общих чертах были сформулированы стоящие перед кибернетикой цели. Первой такой встречей стал семинар, организованный в 1942 г. Фрэнком Фремонтом-Смитом при финансовой поддержке фонда имени Джозайи Мейси — Младшего (Josiah Macy Jr. Foundation). Семинар был посвящён проблеме церебрального торможения. Эта встреча, как и более поздние конференции по кибернетике, имела междисциплинарный характер. В качестве приглашённых лекторов на ней выступили Милтон Эриксон, рассказавший о гипнотизме, а также Говард Лидделл с докладом об условных рефлексах. Участниками семинара были: Мак-Каллок, антрополог и лингвист Грегори Бейтсон, вице-президент фонда Мейси Ларри Фрэнк, культурный антрополог Маргарет Мид, психиатр Лоуренс Кьюби и физиолог Артуро Розенблют. Примечательно, что на этом семинаре были представлены ранние версии двух основополагающих статей о кибернетике. Розенблют обрисовал в общих чертах, как работа Винера и Бигелоу над прибором управления огнём для зенитных систем помогла дать общее описание целенаправленного (телеологического) поведения как живых организмов, так и механических устройств[1058, 1059]. Второй статьёй стала работа Мак-Каллока и Питтса[1060]. Применение инструментария математики, техники и нейрофизиологии для размытия границы между людьми и машинами вызвало неподдельный интерес участников семинара. Маргарет Мид вспоминала: *«Эта первая небольшая конференция была настолько захватывающей, что до конца конференции я не замечала, что сломала себе зуб»*[1061].

Второй встречей, продолжающей зародившуюся традицию, как раз и стала конференция в Принстоне, на которую был приглашён Питтс.

Позже, с 1946 г., конференции по кибернетике стали регулярными, и до 1953-го их состоялось десять. Проводились они при поддержке фонда Мейси и назывались, соответственно, «конференции Мейси».

Фонд помогал организовывать конференции не только по кибернетике, но и, например, нейрофармакологические, и за 19 лет активности провёл 160 конференций, на которых в междисциплинарных группах учёные обсуждали широкий спектр проблем — от машинного обучения до LSD[1062]. Уже в нашем веке семья Мейси совершила неожиданный вклад в американскую археологию: в 2016 г. в штате Нью-Йорк строители обнаружили подлинное

надгробие римского сборщика налогов, умершего в 54 г. н. э. Эту красивую мраморную плиту в конце XIX в. купила в Риме вдова Джозайи Мейси. Надгробие хранилось в особняке Мейси, сгоревшем в 1970-х гг. Разбиравшие руины рабочие не придали значения находке и закопали её вместе с прочим строительным мусором[1063]. Мак-Каллока и Питтса редко называют в числе учёных, повлиявших на развитие вычислительной техники, — в историографии акцент обычно делается на их заслугах в области создания первых искусственных нейронных сетей. Однако сфера информационных технологий на заре компьютерной эры была куда более тесной и связанной, чем сегодня, и взаимное влияние тех или иных пионерских идей и концепций не всегда просто разглядеть сквозь десятилетия стремительного прогресса.

Теперь, после небольшого отступления, можно вернуться в 1945-й.

В июне 1945 г. фон Нейман подготовил исторический документ под названием «Первый проект отчёта об EDVAC»[1064]. Он представлял собой первое в истории опубликованное описание вычислительной машины на основе двоичной логики с хранимой программой. Описанная в документе архитектура (подразумевающая хранение программы и данных в единой памяти) сегодня известна под названием «архитектура фон Неймана» («фон-неймановская») или «принстонская архитектура». Проект EDVAC был продуктом опыта работы над ENIAC, его основная цель — создание новой машины, свободной от ошибок, допущенных в предыдущем проекте. ENIAC тоже был программируемой машиной, однако процесс программирования осуществлялся при помощи перенаправления проводов и переключателей и был чрезвычайно трудоёмким. В ходе обсуждений участники команды ENIAC пришли к выводу, что конфигурацию коммутаторов и проводов, необходимую для выполнения машиной новой функции, можно закодировать внутри машины аналогично кодированию данных.

фон Нейман рассматривал электронные лампы в качестве аналогов нейронов модели Мак-Каллока и Питтса. Объединив их в сеть, можно выполнять любые вычисления. Для хранения программы и данных машине нужна память — те самые петли Питтса с циркулирующими по ним сигналами. *«Элемент, который стимулирует сам себя, будет удерживать стимул бесконечно»*, — писал фон Нейман, пересказывая идею Питтса и привлекая к рассуждениям модульную арифметику. Его отчёт подробно описывает каждый из аспектов новой вычислительной архитектуры, а во всём документе цитируется только одна статья — та самая пионерская работа Мак-Каллока и Питтса «Логическое исчисление идей, присущее нервной деятельности»[1065].

«Первый проект отчёта об EDVAC» был революционной работой, определившей пути развития вычислительной техники на много лет вперёд. Но в то же время он стал и своеобразным яблоком раздора. Несмотря на то что «Первый проект» не предназначался для публикации, его широкое распространение считалось публикацией в юридическом смысле. Это спровоцировало конфликты между участниками проекта EDVAC: Эккертом и Мокли с одной стороны и Голдстайном и фон Нейманом — с другой. На то было две

причины: во-первых, публикация привела к тому, что создатели EDVAC теряли право запатентовать свои идеи; во-вторых, ключевая идея хранимой в памяти программы была плодом дискуссий всего коллектива создателей ENIAC и EDVAC ещё до того, как фон Нейман присоединился к этим проектам, а на титульном листе документа было указано только имя фон Неймана, что создавало впечатление, что именно фон Нейман является автором всех изложенных в «Первом проекте» идей[1066].

Но вернёмся к Питтсу. К 1946 г. он жил в Бостоне с Летвиным, Оливером Селфриджем, студентом Массачусетского технологического института, который в будущем станет «отцом машинного восприятия», и Хайманом Мински, будущим известным экономистом и автором гипотезы финансовой нестабильности. Питтс преподавал математическую логику в MIT и работал с Винером над статистической механикой мозга. В следующем году на Второй кибернетической конференции Питтс объявил, что пишет докторскую диссертацию о вероятностных трёхмерных нейронных сетях. Несмотря на чрезвычайную сложность темы, все, кто знал Питтса, были уверены, что ему она по плечу.

В письме к Карнапу Мак-Каллок перечислил достижения Питтса: *«Он самый всезнающий из учёных и экспертов. Он стал отличным специалистом в области химии красителей, хорошим маммологом, он разбирается в осоках, грибах и птицах Новой Англии. Он знает нейроанатомию и нейрофизиологию из первоисточников на греческом, латинском, итальянском, испанском, португальском и немецком языках, поскольку изучает любой необходимый ему язык, как только он ему понадобится. Такие вещи, как теоретические расчёты электрических цепей и практическая сборка силовых, световых и радиотехнических схем, он выполняет собственноручно. За всю свою долгую жизнь я никогда не видел такого эрудированного и в то же время на самом деле практичного человека»*[1067].

Научная богема и экспериментальная эпистемология 4.3.4

Однако в жизни Питтса не всё было так безоблачно. В октябре 1946 г., прибыв в Нью-Йорк для участия в одной из конференций Мейси, он оставил чемодан с личными вещами в камере хранения Центрального вокзала. Среди прочего в чемодане находилась одна из рукописей Винера, которую тот отдал Питтсу на редактуру. В хороводе событий юноша забыл забрать чемодан, а спохватившись, передал багажную квитанцию Летвину, который в свою очередь спустя две недели передал её Селфриджу. Оливер, однако, не смог разыскать чемодан Питтса. Несколько месяцев спустя Летвин, во время своей следующей поездки в Нью-Йорк, осуществил новую попытку найти потерянный багаж и в итоге обнаружил, что чемодан как невостребованное имущество был отправлен в Чикаго[1068]. В конце концов благодаря Джорджо де Сантильяне,

профессору гуманитарных наук в Массачусетском технологическом институте и другу Винера, чемодан удалось получить назад, и рукопись вернулась к Винеру в начале апреля 1947 г.

Винер был не на шутку рассержен. *«Учитывая эти обстоятельства, пожалуйста, считайте меня больше не связанным с вашей будущей карьерой»*, — писал он Питтсу. Он жаловался Розенблюту на «полную безответственность парней» (Питтса, Летвина и Селфриджа), а Мак-Каллоку — на то, что потеря рукописи означала бы *«утрату приоритета в важной работе». «Один из моих конкурентов, Шеннон из Bell Telephone Company, выпускает свою статью раньше моей»*, — возмущался он. Это, кстати говоря, вовсе не обязательно было паранойей: к этому моменту Шеннон анонсировал свою ещё не опубликованную работу на конференциях 1947 г. в Гарвардском и Колумбийском университетах. Винер был хорошо знаком с идеями Шеннона, поскольку в апреле 1947 г. они выступали на одной сцене, где у обоих была возможность поделиться своими мыслями[1069, 1070].

Винер был обеспокоен недостаточным прогрессом в работе Питтса над диссертацией и считал корнем проблемы разрушительное влияние на него приятелей — Летвина и Селфриджа, вместе с которыми Питтс постоянно ввязывался в различные авантюры. Одна из них касалась геологии. Питтс был уверен, что в скалах Массачусетса должны быть изумруды, и с помощью Селфриджа раздобыл динамит, чтобы устроить взрыв в предполагаемом районе месторождения. Итогом этого взрыва стала сломанная рука Питтса. Другой авантюрой был дебют Летвина и Питтса в роли начинающих голливудских сценаристов. Они написали пьесу «Шестое королевство» о не говорящем по-английски поляке, который приходит к врачу с жалобой на головную боль и в результате серии недоразумений оказывается в сумасшедшем доме. Летвин и Питтс показали пьесу поэту Уистену Одену, который написал рекомендательное письмо писателю Кристоферу Ишервуду. Однако незадолго до прибытия в Голливуд Питтс упал с горного уступа и повредил несколько позвонков. Он был прикован к постели в течение восьми недель, в то время как Летвин устроился писателем-ассистентом в студию Warner Brothers и начал работу над «Бунтарём без причины» (Rebel Without a Cause) режиссёра Николаса Рэя. Питтс и Летвин предложили поместить «Слепящую тьму» — роман Кёстлера, посвящённый политическим репрессиям, — в сеттинг гангстерского фильма и занимались разработкой этой идеи, пока совладелец студии Джек Уорнер собственноручно не прикрыл этот странный проект[1071].

Вообще Питтсу, как и Мак-Каллоку, трудно было отказать в наличии литературного таланта. Их интеллектуальная поэзия производит впечатление и сегодня.

We build our castles in the air,
And from the air they tumble down,
Unless we carry them up there
Until they crack the pate they crown.

And we must lug them everywhere,
From garden walk to crowded town;
We build our castles in the air,
And from the air they tumble down.

And lucky, if when sere and brown,
Before our eyes too lofty stare,
We scape with life and pate, though bare,
On which to plant an honest frown.
We build our castles in the air,
And from the air they tumble down.

Warren McCulloch

Мы за́мки на́ небе возводим,
И не растаять им в пыли,
Пока мы ими сумасбродим,
Пока с ума нас не свели.

Таскай их (жребий безысходен)
По разным уголкам Земли.
Мы замки на небе возводим,
И не растаять им в пыли.

И славен час, коль отцвели,
Но прежде, чем во тьму уходим,
Находим ум, что плодороден,
Где б семена идей взошли.
Мы замки на небе возводим,
И не растаять им в пыли.

Уоррен Мак-Каллок, пер. С. Маркова

On Quantity of Information

Random remarks are traced by little boys
In wet cement; synapses in the brain
Die off; renewing uplift glyphs mountain
And valley in peneplane; the mouth rounds noise
To consonants in truisms: Thus expands law
Cankering the anoetic anonymous.
"If any love magic, he is most impious:
Him I cut off, who turn his world to straw,

Making him know Me." So speaks the nomothete
Concealed in crystals, contracting myosin,
Imprisoning man by close-packing in his own kind.
We, therefore, exalt entropy and heat,
Fist-fight for room, trade place, momentum, spin,
Successful enough if life is undesigned.

Walter Pitts

О количестве информации

Случайные наблюдения маленькие мальчики
Запечатлевают во влажном цементе; синапсы в мозге
Отмирают; повторяющийся подъём вырезает гору
И долину на пенеплене; рот выпячивает шум*
Согласных звуков в трюизмах: так расширяется закон,
*Изъязвляя анонимного аноэтика**.*
«Любящий магию — самый худший из нечестивцев:
Отвергаю его, он превращает свой мир в солому,
*Заставь его познать Меня». Так говорит номотет***,*
Укрытый в кристаллах, сжимающийся миозин,
Пленяющий человека, плотно пакуя его в своём роде.
Поэтому мы превозносим энтропию и тепло,
Кулачный бой за место, торговые площади, импульс, спин,
Весьма успешно при условии, что жизнь возникла без умысла.

Уолтер Питтс, пер. С. Маркова

Перебравшись в Массачусетс, Питтс не забыл своего друга. В письме к Мак-Каллоку он писал: *«Примерно раз в неделю я сильно тоскую по дому, по разговорам с тобой на протяжении всего вечера и ночи»*. Несмотря на успех, Питтс тосковал по дому — а дом для него означал Мак-Каллока, продуктивная работа с которым приносила радость. Мак-Каллок также чувствовал себя потерянным без своего помощника.

Внезапно тучи рассеялись. В 1952 г. Джерри Визнер, заместитель директора Исследовательской лаборатории электроники Массачусетского технологического института, пригласил Мак-Каллока возглавить новый научный проект, посвящённый изучению мозга. Мак-Каллок ухватился за эту возможность, так как это означало, что он снова будет работать с Питтсом. Он

* Пенеплен (в геоморфологии) — практически ровная, местами слабовсхолмлённая поверхность, которая была сформирована на месте древних гор.

** Аноэтический — не полностью сознающий; находящийся на грани сознания.

*** Номотет — законодатель; у афинян: член совета, назначенный для испытания перемен, предполагавшихся в законах Солона.

с радостью обменял профессорскую должность и большой дом в Хинсдейле на звание научного сотрудника и скромную квартиру в Кембридже (пригороде Бостона). План проекта состоял в том, чтобы использовать инструментарий теории информации, нейрофизиологии, статистической механики и вычислительной техники, чтобы понять, как мозг порождает разум. Летвин вместе с молодым нейробиологом Патриком Уоллом присоединились к Мак-Каллоку и Питтсу в их новом офисе, на двери которого была вывешена табличка с надписью: «Экспериментальная эпистемология»[1072].

Грустный эпилог 4.3.5

Беда подкралась незаметно. В 1951 г., через три года после публикации «Кибернетики» и спустя год после выхода «Кибернетика и общество» (The Human Use of Human Beings), Винер попытался опубликовать свои мемуары, но потерпел неудачу — издатели сочли, что рукопись является излишне едкой и изображает в неприглядном виде как самого Винера, так и его наставников, некоторые из которых были ещё живы.

Отказы, полученные от всех издательств, в которые обращался Винер, включая издательство его родного вуза, ещё недавно боровшееся за то, чтобы быть соиздателем «Кибернетики», крайне негативно сказались на душевном состоянии учёного. Фактически они усугубили сильную депрессию, в которую Винер погрузился, когда писал о своём не особенно счастливом детстве. Норберт находился в крайне уязвимом состоянии. Этим воспользовалась его жена Маргарет, которая давно хотела избавить мужа от влияния Мак-Каллока.

Несколькими годами ранее, когда дочь Винера Барбара начала институтское обучение в Чикаго, Мак-Каллок предложил ей временно поселиться в его доме, расположенном недалеко от места учёбы. Винер с благодарностью принял предложение друга и отправил Барбару жить к Мак-Каллокам. Уоррен и Рук чувствовали свою ответственность за 19-летнюю девушку и однажды даже попытались вразумить её, когда она начала встречаться с одним из студентов-медиков. Всё было весьма невинно, если бы не одно но — напомним, что всё это происходило в то же время, когда Мак-Каллок предоставил убежище Питтсу и Летвину. Когда Норберт находился в большой депрессии, Маргарет рассказала ему, что во время пребывания Барбары у Мак-Каллоков Питтс и Летвин якобы много раз соблазняли его дочь. Для Винера это стало шоком, и он впал в бешенство.

Ничего не подозревавшие Питтс и Летвин находились в прекрасном расположении духа. У новой лаборатории было более чем достаточно средств для серьёзных исследований, и её руководителем был Уоррен Мак-Каллок. Друзьям предстояло исследование, направленное на познание секретов человеческого разума. Питтс и Летвин с их новыми модными машинами и блестящими перспективами захватывающих исследований пребывали

в состоянии восторженного веселья. В соответствии со своим настроением они написали Винеру (и Розенблюту) напыщенное письмо, язык которого должен был восприниматься как шутка. Оно началось со слов *«Знайте, о благороднейшие, великодушные и могущественные лорды…»*. По всей видимости, Винер счёл бы это письмо забавным, если бы находился в «нормальном» психическом состоянии. «Откровения» Маргарет о чести его дочери, «запятнанной» этими «мальчиками», были выплеснуты на Норберта всего за сутки до получения письма. Ответ Винера был резким и кратким. Телеграмма, которую он послал Визнеру, гласила:

ПОЛУЧИЛ ДЕРЗКОЕ ПИСЬМО ОТ ПИТТСА И ЛЕТВИНА. ПОЖАЛУЙСТА, ПРОИНФОРМИРУЙТЕ ИХ, ЧТО ВСЯКАЯ СВЯЗЬ МЕЖДУ МНОЙ И ВАШИМИ ПРОЕКТАМИ ПРЕКРАЩЕНА НАВСЕГДА. ТЕПЕРЬ ОНИ ВАША СОБСТВЕННАЯ ПРОБЛЕМА. ВИНЕР.

Мак-Каллок пережил разрыв очень тяжело. Хотя он и старался вести себя «как обычно» в жизни и на работе, тем, кто его окружал, было ясно, что он несёт в душе тяжкий груз. Позднее Винер признался, что разрыв с коллегами и друзьями оказал разрушающее воздействие на его здоровье. Но тяжелее всего воспринял произошедшее Питтс[1073].

А затем случилась история с лягушками. В подвале строения № 20 в Массачусетском технологическом институте Летвин держал группу лягушек вместе с мусорным баком, полным сверчков. В то время биологи полагали, что глаз похож на фотопластинку, которая пассивно регистрирует пятнышки света и в виде нервных импульсов пересылает их в мозг, который производит сложную обработку полученных сигналов. Летвин решил проверить эту идею, вскрыв череп лягушки и прикрепив электроды к отдельным волокнам зрительных нервов.

Вместе с Питтсом, Мак-Каллоком и чилийским биологом и философом Умберто Матураной он проводил эксперименты со зрением лягушек — увеличивал и снижал яркость источника света, показывая лягушкам цветные фотографии их естественной среды обитания, а также управляемых магнитами искусственных мух. При этом Летвин записывал сигналы, передаваемые глазом в мозг, сопоставляя их с применёнными стимулами. Ко всеобщему удивлению, глаз не просто регистрировал то, что видел, а фильтровал и анализировал информацию о визуальных характеристиках, таких как контрастность, кривизна и движение. *«Глаз говорит с мозгом на уже хорошо воспринимаемом, истолкованном и организованном языке»*, — сообщили авторы в ставшей затем классической статье «Что сообщает глаз лягушки мозгу лягушки», опубликованной в 1959 г.

Результаты этого эксперимента потрясли мировоззрение Питтса до основания. Ранее он считал, что мозг обрабатывает информацию при помощи цифровых нейронов и математической логики. Но оказалось, что беспорядочные аналоговые процессы в сетчатке глаза выполняли как минимум

часть этой работы. *«После того как мы изучили лягушку, ему стало очевидно, что даже если логика [мозга] и имела значение, она не играла столь важной роли, какой можно было бы ожидать,* — говорил Летвин. — *Это разочаровало его. Он никогда не признался бы в этом, но это, видимо, усиливало его отчаяние из-за потери дружбы Винера».* Поток неприятных событий усугубил депрессию, с которой Питтс боролся годами. *«У меня есть что-то вроде личного горя, о котором я хотел бы услышать твой совет»,* — писал Питтс Мак-Каллоку в одном из своих писем. *«В последние два-три года я заметил растущую тенденцию к меланхоличной апатии или депрессии. [Её] эффект состоит в том, что позитивная ценность, кажется, исчезает из мира, так что кажется, что ничего не стоит усилий и что я бы ни делал или что со мной ни происходило, перестаёт иметь большое значение...»*

Теперь без Винера отчаяние Питтса стало смертельным. Он начал сильно пить и всё больше отдалялся от друзей. Когда ему предложили докторскую степень, он отказался подписать документы. Питтс сжёг свою диссертацию вместе со всеми своими заметками и бумагами. Были уничтожены плоды многих лет работы — важные результаты, которые все с нетерпением ждали. Визнер предложил Летвину улучшить поддержку лаборатории, если тот сможет восстановить какие-либо фрагменты диссертации, но всё было утрачено.

Питтс остался работать в MIT, но это было едва ли чем-то большим, чем просто жестом сострадания; он почти ни с кем не разговаривал и часто

исчезал. *«Мы должны были следить за ним ночь за ночью,* — говорил Летвин. — *Ужасно было наблюдать за тем, как он себя разрушает».*

В понедельник, 21 апреля 1969 г., дрожащей рукой алкоголика, путаясь в днях недели, Питтс отправил письмо из своей палаты в больнице Бет-Исраэль в палату Мак-Каллока в отделении интенсивной терапии сердца в госпитале Бригама. *«Я понимаю, что у тебя был лёгкий коронарный приступ <...> что ты присоединён ко множеству датчиков, подключённых к панелям и сигналам тревоги, которые постоянно контролирует медсестра, и в силу этого ты не можешь перевернуться в постели. Без сомнения, это кибернетика. Но всё это вызывает во мне ужасную грусть».* Сам Питтс провёл в больнице три недели из-за проблем с печенью и желтухи. 14 мая 1969 г. он умер в одиночестве в пансионате в Кембридже от кровотечения из варикозно расширенных вен пищевода, что было связано с циррозом печени. Четыре месяца спустя скончался и Мак-Каллок, как будто существование одного без другого было просто нелогичным. Петля, по которой циркулировал сигнал, разомкнулась[1074].

Мак-Каллок и Питтс пережили Винера на пять лет — Норберт умер в 1964 г. от сердечного приступа, случившегося с ним во время лекционного тура в Стокгольме. Летвин, последний из первоначальной группы кибернетиков, сильно пережил всех и ушёл из жизни только в 2011 г.

На склоне лет Летвин вспоминал, что после его почтительной речи о Норберте Винере на конференции в Генуе (по всей видимости, в 1965 г.[1075]) вдова Винера Маргарет подошла к нему, чтобы поблагодарить за добрые слова о покойном муже. Летвин тогда уже знал о причине злосчастной телеграммы Винера — ему об этом в начале 1960-х рассказал Артуро Розенблют, и вот как Летвин описал эту встречу: *«Я подготовил очень осторожную и хвалебную речь, и после неё миссис Винер подошла поблагодарить меня и протянула руку — вы знаете, она была хрупкой женщиной, — но я на самом деле хотел ударить её так сильно, как мог, потому что знал, что это она устроила разрыв»*[1076].

4.4 Фрэнк Розенблатт, перцептрон, кот Тобермори и крысы

— Вы на самом деле хотите, чтобы мы поверили, — говорил сэр Уилфрид, — что вам удалось найти способ обучения животных человеческой речи и что старина Тобермори оказался вашим первым удачным учеником?

— Над этой проблемой я работал 17 лет, — отвечал мистер Эппин, — но лишь в последние 8–9 месяцев появились первые проблески успеха. Разумеется, я провёл эксперименты с тысячами животных, однако последнее время работал только с кошками, этими чудесными созданиями, которые смогли столь блестяще вписаться в нашу цивилизацию, сохранив при этом все свои высокоразвитые животные инстинкты. То у одной, то у другой кошки обнаруживал я выдающийся интеллект, впрочем, как бывает и с человеческими особями. Когда же я познакомился с Тобермори, то сразу понял, что имею дело с суперкотом, существом экстраординарного интеллекта. В предшествующих экспериментах я далеко продвинулся по пути к успеху, но в работе с Тобермори, можно сказать, я достиг своей цели.

Саки. *Тобермори*

4.4.1 Наследие Мак-Каллока и Питтса

Итак, Мак-Каллоку и Питтсу удалось создать первую модель искусственного нейрона, разрешить кажущийся парадокс с петлями, образуемыми нейронными цепями, обнаружить гипотетический механизм, при помощи которого сеть, составленная из искусственных нейронов, могла бы запоминать информацию. Какие проблемы теперь отделяли человечество от умения создавать машины, способные, например, отличить фотографию котика от фотографии собаки?

Искусственный нейрон Мак-Каллока и Питтса через множество входных синапсов получает некоторый набор двоичных сигналов (т. е. нулей или единиц). Сигнал может поступить от рецептора (например, фоторецептора, который реагирует на освещённое пятнышко в некотором месте изображения, выдавая на выход единичный сигнал; Мак-Каллок и Питтс в своей статье 1943 г. называют входные нейроны нейронной сети «периферическими афферентами»[1077] — мне нравится этот термин, и я просто оставлю его здесь) или от предыдущего нейрона в цепочке. Каждый из сигналов умножается на некоторый синаптический вес, который может быть положительным или отрицательным числом. Положительный вес соответствует возбуждающему синапсу, отрицательный — тормозящему. Если сумма входных сигналов, перемноженных на соответствующие синаптические веса, превышает порог активации нейрона, то нейрон передаёт на выход сигнал, равный 1, в противном случае — сигнал, равный 0.

Так обычно описывают искусственный нейрон Мак-Каллока и Питтса в современной литературе по машинному обучению. В действительности дело обстояло не совсем так. Статья 1943 г. написана с применением весьма сложной и непривычной для большинства современных читателей нотации. Даже Стивен Клини, работавший со статьёй в 1950-е гг., столкнулся с рядом нешуточных сложностей.

«Настоящая статья является частично изложением их результатов; но мы обнаружили, что часть их [Мак-Каллока и Питтса] работы обращается с произвольными нервными сетями малопонятным [obscure] образом, поэтому мы пошли здесь своим путём», — писал он в 1951 г. Позже, обнаружив явную неточность в одном из результатов, полученных Мак-Каллоком и Питтсом, Клини в конце концов сдаётся: *«Этот очевидный контрпример отвратил нас от дальнейших попыток расшифровать третий раздел статьи Мак-Каллока и Питтса»*[1078].

Первое отличие, которое бросается в глаза внимательному читателю статьи: условие срабатывания нейрона у Мак-Каллока и Питтса сводится к тому, что нейрон i запускается в момент времени t тогда и только тогда, когда ни один из нейронов, имеющих тормозящий синапс к нему, не сработал в момент времени $t-1$ и более θ* нейронов, имеющих возбуждающий синапс к нему, сработали в момент времени $t-1$. При этом целое положительное число θ называется порогом активации нейрона i. Таким образом, возбуждающие синапсы в модели Мак-Каллока всегда имеют единичные веса, а тормозящие всегда имеют отрицательный вес, который по модулю не уступает сумме весов всех возбуждающих синапсов к тому же нейрону минус порог активации (то есть вес каждого из тормозящих синапсов всегда оказывается достаточным, чтобы «перевесить» все возбуждающие нейроны, даже если они сработают все вместе), а θ всегда является целым положительным числом.

* Это буква «тета», а не ноль, перерубленный пополам; я мог бы заменить её на другую букву без перемены смысла, но всё-таки решил оставить её ради аутентичности, а также для того, чтобы читателям, боящимся математических выражений, в этом месте было страшнее.

Впоследствии исследователи отказались от этих ограничений, по сути заменив логику высказываний, лежащую в основе модели Мак-Каллока — Питтса, на нечёткую логику. Кроме того, при помощи нехитрого трюка можно избавиться и от порога активации нейрона как от отдельного параметра. Для этого достаточно добавить в нейронную сеть фиктивный входной нейрон («периферический афферент»), срабатывающий на каждом шаге времени. Этот нейрон должен иметь синапсы к каждому из остальных («непериферических») нейронов, при этом веса этих синапсов будут равны тому самому порогу θ, взятому с противоположным знаком. Однако ничего этого в работе Мак-Каллока и Питтса мы не находим[1079], всё это уже более поздние трансформации, проделанные другими исследователями.

фон Нейман так оценивал модель, созданную Мак-Каллоком и Питтсом: *«„Функциональность“ такой сети может быть задана путём выделения некоторых входов системы и некоторых её выходов с последующим описанием того, какие входные стимулы для первого должны вызывать какие конечные стимулы для второго… Важным достижением Мак-Каллока и Питтса является то, что такая формальная нейронная сеть способна реализовать любую функциональность, которую можно в принципе определить логически, строго и однозначно при помощи конечного числа слов»*[1080, 1081].

Строго говоря, фон Нейман в данном случае был не совсем прав. Работы Мак-Каллока и Питтса не содержат формального доказательства тезиса о тьюринг-полноте рекуррентных нейронных сетей, Мак-Каллок и Питтс считали его тривиальным.

Именно задачу формально доказать этот тезис и ставил перед собой Клини, когда предпринял попытку разобрать исследование Мак-Каллока и Питтса. В процессе он определил понятие «регулярные события» [regular events] (сегодня называемые «регулярными языками» [regular languages], «рациональными языками» [rational languages] или «регулярными множествами» [regular sets]) и доказал, что сети Мак-Каллока и Питтса могут «представлять» [represent] регулярные события (в современной терминологии они могут «принимать» [accept] регулярные языки)[1082, 1083]. Именно от этого термина происходит понятие «регулярные выражения» [regular expressions], хорошо известное большинству современных программистов.

Забавно, что термин «регулярные» в отношении событий, языков, множеств и выражений является хорошей иллюстрацией принципа «нет ничего более постоянного, чем временное». В своей работе Клини пишет: *«Сейчас мы опишем класс событий, которые будем называть „регулярными событиями“ (мы будем рады любым предложениям относительно более наглядного термина)».* Как видим, за 70 лет подходящих предложений не поступило. Прилагательное *regular* в английском языке имеет несколько значений. Это и «регулярный», и «обычный», и «очередной», и «правильный», и даже «официальный». Что именно из этого имел в виду Клини? Этим вопросом исследователи задаются и в наши дни[1084, 1085, 1086]. По всей видимости, он хотел указать на то, что эти события обязательно происходят всякий раз, когда модель

находится в одном и том же состоянии и получает на вход один и тот же сигнал.

В той же статье Клини также определил альтернативный формализм, являющийся обобщением сетей Мак-Каллока и Питтса, позволив «ячейкам» (т. е. нейронам) сети принимать любые из конечного числа внутренних состояний. Клини назвал свой новый формализм «конечными автоматами» [finite automata] и показал, что сети Мак-Каллока и Питтса вычислительно эквивалентны конечным автоматам[1087, 1088].

В общем, так или иначе, для того чтобы заставить работать сеть, составленную из нейронов Мак-Каллока и Питтса, вам пришлось бы запрограммировать её для выполнения задачи собственноручно. То, каким образом подобная сеть может обучаться, было совершенно неясно. Модель не предполагала, что в процессе работы сети пороги активации нейронов могут изменяться, синапсы менять свой тип (с возбуждающих на тормозящие или наоборот) или, тем более, появляться либо исчезать. Единственной доступной такой сети формой памяти были петли из нейронов, но довольно сложно представить себе механизм обучения, основанный на использовании такого типа памяти.

4.4.2 Развитие нейросетевых моделей

В целом на первый взгляд, модель Мак-Каллока и Питтса порождала больше вопросов, чем давала ответов. Но всё же это было куда лучше, чем отсутствие даже вопросов. Вопрос побуждает кого-то задуматься над ответом на него, а удачные ответы двигают науку и технологии вперёд. У Мак-Каллока и Питтса нашлось немало последователей, желающих улучшить исходную модель или даже предложить новую.

В развитии нейросетевых моделей в 1950-е гг. можно выделить два принципиально разных подхода: монотипический и генотипический. В рамках монотипического подхода свойства нейронов задаются изначально, а топология сети полностью фиксирована. Собственно, монотипический подход эквивалентен обычному программированию, в котором роль программы выполняет конструируемая создателем нейронная сеть. Символьные модели нейронных сетей, подобные модели Мак-Каллока и Питтса, точно так же, как и языки программирования, основаны на формальной логике.

Альтернативой монотипическому стал генотипический подход. При его использовании свойства элементов сети могут быть полностью определены, но параметры этих элементов задаются только частично (например, с помощью набора ограничений и параметров вероятностных распределений). При использовании генотипического подхода описание сети соответствует по сути не отдельному её экземпляру, а целому классу возможных сетей, обладающих заданными свойствами. Это различие в подходах приводит

к важным различиям в типах создаваемых моделей и в том, как их можно применять. Например, в случае монотипических моделей можно применять бинарную алгебру логики (высказываний), а вот теория вероятностей плохо подходит для анализа качества работы такой системы. Статистика и теория вероятностей предназначены для анализа множеств объектов или событий и малополезны в случае изучения свойств системы с детерминированным поведением. Конечно, мы можем сделать вывод о том, решает или не решает данная сеть поставленную перед ней задачу. Однако если мы принимаем принцип «либо да, либо нет», то с точки зрения вероятностного подхода задача превращается в абсурдный анекдот: «Какова вероятность встретить на улице динозавра? Пятьдесят процентов: или встретишь, или не встретишь!»

С другой стороны, при работе с генотипическими моделями бинарная алгебра логики может стать неадекватным задаче инструментом. Хотя конкретный экземпляр системы, созданной при помощи генотипического подхода, вполне может быть описан языком формальной логики, наибольший интерес представляют свойства класса систем, порождаемого заданными правилами их построения. Эти свойства лучше всего описывать статистически, поэтому теория вероятностей играет важную роль в генотипическом подходе[1089].

Мы уже упоминали про попытку Питтса применить статистическую механику к нейронным сетям, осуществлённую им под влиянием идей Винера. Вместе с Мак-Каллоком и учеником Рашевского Гербертом Лэндалом Питтс в 1943 г. опубликовал в «Бюллетене математической биофизики» работу «Статистическое следствие логического исчисления нервных сетей» (A Statistical Consequence of the Logical Calculus of Nervous Nets). Хотя топология сети в статье полагается по-прежнему неизменной, выдвигается предположение, что нервные импульсы генерируются в нейронах с различными частотами. Авторы вводят понятие «период латентного суммирования» [period of latent addition] — промежуток времени, в пределах которого нервные импульсы на входе нейрона суммируются (или же происходит торможение — в случае получения на этом промежутке времени импульса от нейрона, связанного с нашим нейроном тормозящей связью). Это расширение исходной модели, по мнению авторов, *«позволяет нам производить определённые предсказания количественных характеристик ответа на основе количественных характеристик стимула. Эти предсказания можно сравнивать с наблюдениями и, если необходимо, изменять сети до тех пор, пока последующие предсказания не будут подтверждены»*[1090].

В некотором смысле эта процедура напоминает обучение искусственной нейронной сети, хотя в действительности авторы работы формулируют несколько иную цель, а именно подбор параметров модели таким образом, чтобы её предсказания соответствовали «численно измеримым психическим феноменам», возникающим в результате нервной активности в биологической сети. Словом, речь идёт о создании достоверной модели естественной нейронной сети, а не об обучении искусственной нейронной сети для

решения прикладных задач. Кроме того, чётких представлений о конкретных алгоритмах подбора параметров сети у создателей первой модели искусственного нейрона, по всей видимости, не было.

Тьюринг интересовался возможностью моделирования работы нейронных сетей по крайней мере с 1946 г., когда писал в одном из писем к Россу Эшби: *«В работе над [компьютером] ACE [Automatic Computing Engine] меня больше интересует возможность создания моделей работы мозга, чем использование машины для прикладных вычислений. <...> Хотя мозг в действительности может работать, изменяя свои нейронные цепи за счёт роста аксонов и дендритов, мы, однако, могли бы создать модель внутри ACE, позволяющую нам делать то же самое без изменения существующей конструкции ACE, изменяться будут только хранящиеся в памяти машины данные...»* [1091, 1092]

В неопубликованной работе под названием «Мыслящие машины» (Intelligent Machinery)[1093], написанной в 1948 г., Тьюринг описал сети нейроноподобных логических элементов, названных им «неорганизованными машинами» [unorganized machines].

Машины типа *A*, описанные в статье, состоят из случайно соединённых логических элементов, каждый из которых имеет два входа и один выход. Логические элементы имеют два состояния — 0 или 1. Это состояние в момент срабатывания элемента определяется при помощи логического вентиля «И-НЕ» — такие вентили называют также NAND-вентилями или элементами Шеффера в честь американского математика и логика Генри Шеффера, который в 1913 г. доказал, что функция «И-НЕ» (инверсия конъюнкции) является универсальной, которой можно заменить все другие логические функции.

Последовательностью срабатывания элементов управляет синхронизирующее устройство, подключенное к каждому из элементов. Это устройство через определённые интервалы времени одновременно посылает сигналы всем элементам, вызывая их срабатывание.

Тьюринг отметил, что последовательность внутренних состояний такой машины будет носить циклический характер, при этом длина цикла будет не более $2N$, где N — число элементов в машине.

Затем Тьюринг предложил модификацию машины типа *A*, при которой в каждую связь «И-НЕ» между двумя элементами добавляется сеть из трёх элементов (где все связи тоже типа «И-НЕ»):

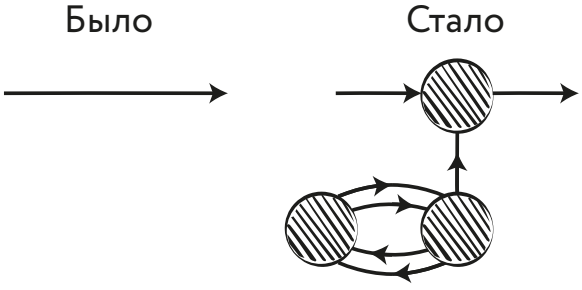


Рис. 89. Предложенная Тьюрингом модификация связей машины типа *A*

4.4.2 Развитие нейросетевых моделей

Такая сеть выполняет роль модификатора сигнала. Несложно заметить, что в результате соединение может — в зависимости от значений, помещённых в «нижние» ячейки модификатора (две единицы, два нуля, ноль и единица), — приобрести три возможных типа поведения соответственно: 1) оно будет инвертировать проходящий через него сигнал, то есть заменять 1 на 0, а 0 на 1; 2) оно будет превращать все сигналы в 1; 3) оно будет чередовать поведение (1) и (2) в чётные и нечётные моменты времени. Машина с такими модификаторами соединений получила у Тьюринга название «машина типа *B*». Все машины типа *B* являются в то же время и машинами типа *A*, но не все машины типа *A* являются машинами типа *B*.

В целом сети Тьюринга напоминают сети Мак-Каллока и Питтса: даже использование цикла в качестве механизма памяти для хранения состояния модификатора отсылает нас к рассуждениям Питтса. Однако Тьюринг делает два важных шага вперёд. Во-первых, он рассматривает возможность моделирования работы сети на программном уровне при помощи электронной вычислительной машины общего назначения. А во-вторых, в его статье содержится целый раздел, посвящённый машинному обучению или, как называет его сам Тьюринг, «образованию машин» [Education of Machinery]! Для этого он анализирует возможные способы «организации неорганизованных машин». Тьюринг вносит изменение в архитектуру модификатора соединения, снабжая его двумя внешними входами.

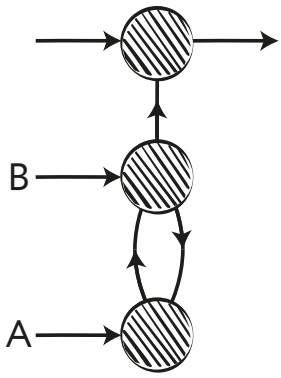


Рис. 90. Предложенное Тьюрингом изменение архитектуры модификатора соединения

Таким образом, работа соединения становится управляемой: подавая на входы *A* и *B* разные сигналы, можно добиться переключения поведения модификатора.

По словам Тьюринга, благодаря применению *«соответствующих вмешательств, имитирующих обучение [education]»*, машина может быть обучена *«выполнять любую требуемую работу при наличии достаточного времени и при условии достаточного количества элементов»*.

Тьюринг рассуждает о том, что настройка машины для выполнения конкретной операции может производиться как вручную, так и на основе системы подкреплений и штрафов, соответствующих удовольствию и боли у живых организмов. При этом сами принципы функционирования сети достаточно просты — в живой природе они могут быть описаны сравнительно небольшим набором генов, благодаря чему такие принципы могут быть выработаны в процессе эволюции. Некоторые исследователи считают, что в этих рассуждениях Тьюринг предвосхитил появление генетических алгоритмов, то есть алгоритмов, имитирующих процессы естественной изменчивости, скрещивания и отбора для решения различных задач оптимизации. Сегодня машины типа *A* и машины типа *B* часто называют нейронными сетями Тьюринга или просто сетями Тьюринга.

Тьюринг не приводит конкретных алгоритмов обучения машин типа *B*, замечая, что обучение таких машин слишком сложный процесс для того, чтобы его можно было смоделировать при помощи бумаги и карандаша, однако приводит пример более простой машины (машина типа *P*), которая первоначально обладает случайным поведением, выдавая случайные ответы на все запросы. Если ответ окажется правильным, машина запомнит, что в такой ситуации следует дать именно этот ответ (положительное подкрепление). Если же ответ окажется неправильным, машина, напротив, запомнит, что в этой ситуации именно этот ответ давать не следует. Тьюринг ограничивается описанием принципа работы машины, опуская детальное описание её архитектуры[1094, 1095].

Причина, по которой работа Тьюринга не была опубликована, довольно забавна. Можно сказать, что она пала жертвой отбора. Начальник Тьюринга по имени Чарльз Дарвин, внук знаменитого основоположника теории эволюции, отозвался о статье Тьюринга в критическом ключе, заявив, что по своему качеству она ничем не лучше школьного сочинения.

Между тем исследования в области искусственных нейронных сетей продолжались. В 1948 г. Альфонсо Шимбел и Анатоль Рапопорт из Чикагского университета описали семейство статистически организованных сетей. Отталкиваясь от модели Мак-Каллока и Питтса, Шимбел и Рапопорт рассмотрели различные параметры нейрона и его компонентов в качестве случайных величин, имеющих некоторые вероятностные распределения. Из них они вывели общее уравнение для расчёта вероятности того, что нейрон в указанном месте сработает в указанное время[1096].

4.4.3 Исследования нейробиологов

Работа Шимбела и Рапопорта, как и исследования Тьюринга, не получила дальнейшего развития, и инициатива перешла в стан нейропсихологов, а именно к Дональду Хеббу. В книге «Организация поведения: нейропсихологическая теория» (The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory) он сформулировал принцип, который сегодня известен под названием «хеббовское обучение» (Hebbian learning): *«Когда аксон клетки A находится достаточно близко, чтобы возбудить клетку B, и многократно или постоянно принимает участие в её срабатывании, в одной или обеих клетках происходит некоторый процесс роста или метаболические изменения таким образом, что эффективность A как одной из клеток, возбуждающих B, растёт».* Часто этот принцип афористично формулируют так: «нейроны, которые возбуждаются вместе, связываются вместе» [neurons that fire together, wire together].

После установления таких связей нейроны образуют клеточный ансамбль таким образом, что любое возбуждение хотя бы одного относящегося к нему нейрона приводит в возбуждение весь ансамбль. Сочетание их связей

формирует постоянно меняющийся алгоритм, определяющий реакцию мозга на раздражители[1097].

4.4.3

Исследования нейробиологов

Хебб не был первым, кто высказал эту идею. Ещё в 1932 г. американский психолог Эдвард Торндайк предположил, что обучение заключается в постепенном усилении проводящих путей между нейронами. В начале века Торндайк изучал поведение кошек при помощи так называемого проблемного ящика [puzzle box]. Помещённое в ящик животное могло освободиться в результате некоторого действия (например, потянув за рычаг или нажав на педаль). Когда кошка выбиралась из ящика, то получала вознаграждение, обычно еду. Поначалу кошки, помещённые в ящик, беспокойно бродили по нему и мяукали, но не знали, как выбраться. В конце концов они случайно наступали на педаль на полу — и дверь открывалась. Чтобы выяснить, могут ли кошки обучаться «вприглядку», Торндайк заставлял их наблюдать за выбиравшимися из ящика сородичами. Однако эта серия экспериментов завершилась неудачей: кошки упорно не желали учиться. Тогда Торндайк вернулся к методике обучения методом проб и ошибок. Он обнаружил, что после случайного нажатия на педаль кошки начинали в каждом последующем испытании нажимать на неё быстрее. Наблюдая за животными, Торндайк замерял время, потраченное ими на побег из ящика, а затем построил график времени в зависимости от номера эксперимента — он назвал его «кривая обучения» (у психологов принято говорить «кривая научения» [learning

curve]). Этот же термин используется сегодня при обучении искусственных нейронных сетей. Оказавшись в ящике, кошки поначалу испытывали трудности, но в итоге схватывали закономерность и выбирались всё быстрее и быстрее в каждом последующем опыте. В результате время сокращалось до некоторой минимальной величины и стабилизировалось на ней. В итоге Торндайк получил *S*-образные кривые. Позже он повторил те же опыты с другими видами животных и обнаружил, что все они обучаются примерно одинаково, различия наблюдаются только в скорости этого процесса[1098].

В книге «Основы обучения» (The Fundamentals of Learning, 1930) Торндайк высказывает догадку, развитую позже Хеббом: *«…должен быть некоторый физиологический отбор в результате повторения. Это может быть изменение в синапсах, в результате которого многократное прохождение стимула по одному и тому же пути активно увеличивает проводимость за счёт снижения проводимости в других местах. Или это может быть своего рода избирательная интеграция, посредством которой повторяющееся действие более или менее ассоциативной системы в целом по определённому шаблону подавляет тенденцию к действию по другим шаблонам. Или это может быть что-нибудь ещё»*[1099]. Это высказывание Торндайка развивает предложенную им ещё в 1911 г. концепцию «закона эффекта»: *«Из нескольких реакций на одну и ту же ситуацию те, которые сопровождаются удовлетворением воли животного или за которыми удовлетворение вскоре следует, при прочих равных условиях будут более прочно связаны с ситуацией, так что, когда она [ситуация] повторяется, они [реакции] с большей вероятностью будут повторяться; те же, которые сопровождаются дискомфортом для воли животного или за которыми дискомфорт вскоре следует, при прочих равных обстоятельствах ослабляют свои связи с этой ситуацией, поэтому, когда она повторяется, вероятность их возникновения будет меньше. Чем больше удовлетворение или дискомфорт, тем больше укрепление или ослабление связи»*[1100].

Параллельно с Торндайком исследованием процессов обучения у животных занимался знаменитый российский, а затем советский учёный Иван Павлов, создатель теории условных рефлексов. Среди прочего Павлов и его коллеги исследовали влияние соотношения силы условного и безусловного подкрепления на интенсивность и продолжительность условного рефлекса. Соответствующая закономерность, сформулированная Павловым и его учеником Борисом Бабкиным, получила название «закон относительной силы»[1101]. Исследования Павлова стали источником многих новаторских идей в области физиологии нервной деятельности, однако они были по большей мере сосредоточены в области крупномасштабной структуры и функций — на страницах его работ почти не встречаются рассуждения о процессах, происходящих на клеточном уровне.

Однако там, где Павлов всё-таки спускается на клеточный уровень, его суждения весьма точны и одновременно осторожны: *«…связывание импульсов в разных областях мозга путём образования новых нервных связей является первым нервным механизмом, с которым мы столкнулись при изучении*

физиологии полушарий. Вопрос о месте, где возникает эта новая нервная связь, ещё не получил чёткого ответа. Это происходит исключительно в коре или между корой и подкорковыми областями? <...> В любом случае клетки, преимущественно возбуждённые в данный момент времени, становятся очагами, притягивающими к себе нервные импульсы, возбуждённые импульсами новых стимулов, которые при повторении имеют тенденцию следовать по тому же пути и, таким образом, устанавливать условные рефлексы» [1102].

Хотя работа Хебба является гораздо более полной в деле определения модели процесса обучения, чем большинство предыдущих работ в этой области, она всё ещё слишком вольна в своих определениях, чтобы найти однозначное отражение в виде алгоритма. Однако соображения Хебба оказались важным отправным пунктом, который позволил сразу нескольким группам исследователей разработать конкретные алгоритмические версии принципа Хебба и даже воплотить их в конструкциях экспериментальных устройств.

4.4.4 Первые эксперименты в области искусственных нейронных сетей

Одним из первых таких устройств стал SNARC (Stochastic Neural Analog Reinforcement Calculator, стохастический нейронный аналоговый калькулятор с подкреплением), разработанный Марвином Минским.

По просьбе Минского Джордж Миллер, один из основателей когнитивной психологии, договорился о финансировании проекта за счёт средств Управления научных исследований военно-воздушных сил США летом 1951 г. (речь шла о нескольких тысячах долларов). «Рабочими руками» проекта стал сам Минский, который был тогда аспирантом-математиком в Принстонском университете, а также аспирант-физик Дин Эдмондс, умелый электронщик, добровольно вызвавшийся участвовать в проекте.

Сама машина представляла собой случайное соединение из сорока искусственных нейронов и моделировала поведение крысы, пытающейся отыскать выход из лабиринта.

Каждый из нейронов был реализован при помощи шести электроламп и двигателя. Память машины сохранялась в положениях ручек управления — по одной на каждый искусственный нейрон, — и, когда машина обучалась, она использовала сцепления для регулировки своих ручек. Для перемещения сцеплений использовался резервный гиропилот * от бомбардировщика B-24.

Топология сетей выбиралась случайным образом. «Крыса» создавалась в какой-то точке в сети и затем отправлялась изучать путь к заданной конечной точке. Сначала «крыса» перемещалась по лабиринту хаотически. Если в результате

* Гиропилот (также гирорулевой) — электронавигационный прибор, работающий на основании показаний гирокомпаса. Гиропилот осуществляет автоматическое удержание судна на заданном курсе с гораздо большей точностью, чем это может делать человек, использующий компас.

этих хаотических перемещений ей удавалось наткнуться на выход, то для закрепления удачного поведения в систему путём нажатия кнопки подавался сигнал подкрепления. Индикаторная панель с рядами ламп позволяла наблюдателям следить за перемещениями «крысы». В ходе экспериментов выяснилось, что из-за недоработки в архитектуре системы несколько крыс, помещённых в один и тот же лабиринт, могли взаимодействовать друг с другом: если какая-то из «крыс» находила путь, другие были склонны следовать за ней.

Устройство Минского и Эдмондса было, вероятно, первой самообучающейся электронной машиной[1103, 1104]. В данном случае слово «электронной» является важной оговоркой, поскольку самообучающиеся машины на электромеханической основе к тому моменту уже были известны. Часто первой такой машиной называют «мышь» из проекта «Тезей» [Theseus], созданную примерно за год до SNARC Клодом Шенноном. Робомышь, в основу которой была положена система телефонных реле, успешно находила и запоминала путь в лабиринте размером 5 × 5 клеток, используя метод проб и ошибок[1105].

Но, возможно, пальму первенства стоит отдать Россу Эшби с его гомеостатом [Homeostat]. Мы уже упоминали письмо, в котором Тьюринг пытался убедить Эшби использовать для своих экспериментов машину ACE. Эшби, однако, не внял советам коллеги и решил создать специализированное устройство, которое должно было стать работающей иллюстрацией принципа гомеостаза. Мы остановимся на этом любопытном устройстве несколько подробнее. Хотя гомеостат обычно и не относят к числу нейросетевых систем, в действительности он как раз являлся одним из первых примеров реализации искусственных нейронных сетей. Причиной недостаточной очевидности этого факта является весьма оригинальный подход, применённый Эшби, который остался во многом непонятым как современниками этого неординарного учёного, так и впоследствии специалистами по истории науки. Коллега Винера кибернетик Джулиан Бигелоу, ознакомившись с устройством гомеостата, задал вопрос: *«Имеет ли эта специфическая модель какое-либо отношение к нервной системе? Это, возможно, прекрасная копия чего-то, но бог знает чего именно».*

Давайте попробуем разобраться по порядку, какую именно задачу стремился решить Эшби и что представляли собой методы, положенные в основу гомеостата.

Термин «гомеостаз» (или «гомеостазис», *homeostasis*), предложенный в 1932 г. американским физиологом Уолтером Кенноном, образован от греческих слов ὅμοιος, что означает «одинаковый», «подобный», и στάσις — «стояние», «неподвижность». Кеннон использовал введённый им термин для обозначения устойчивых состояний организма. Учёный так объяснил необходимость использования нового понятия: *«Постоянные условия, которые поддерживаются в организме, можно назвать равновесием [equilibria]. Это слово, однако, приобрело весьма определённое значение применительно к относительно простым физико-химическим состояниям в закрытых системах, где известные силы уравновешивают друг друга. Скоординированные физиологические процессы,*

4.4.4

Первые эксперименты в области искусственных нейронных сетей

которые поддерживают большинство устойчивых состояний в организме, настолько сложны и настолько специфичны для живых существ, что предполагают в ряде случаев совместную работу мозга и нервов, сердца, лёгких, почек и селезёнки. Поэтому я предлагаю специальное обозначение для этих состояний — гомеостаз. Это слово не означает что-то застывшее и неподвижное, стагнацию. Оно обозначает состояние, которое может изменяться, но при этом сохраняет относительное постоянство» [1106]. Термин быстро обрёл популярность в среде кибернетиков и стал трактоваться в более широком ключе — как механизм саморегуляции открытой системы, направленный на достижение «динамического равновесия». Под последним понималась способность системы поддерживать определённое состояние за счёт того, что её компоненты скоординированно реагируют на возмущающие воздействия.

В воскресном выпуске *The New York Times* от 23 января 1949 г. была опубликована рецензия на книгу «Кибернетика» Норберта Винера под названием «Вещи, о которых мечтают» (The Stuff That Dreams Are Made On)[1107]. Автор статьи, Джон Пфейффер, рассказал читателям о смелых предсказаниях Норберта Винера, а именно о думающих машинах будущего. Автор рецензии был весьма осторожен в своих оценках. Даже сегодня, изучая этот текст с позиции послезнания, в нём трудно найти суждение, к которому можно было бы легко придраться. У Пфейффера было всего ⅜ газетной полосы, чтобы рассказать читателям о ключевых идеях Винера, и среди прочего он посвятил абзац упомянутым в книге Винера исследованиям Мак-Каллока и Питтса. В качестве одного из основных выводов этих исследований Пфейффер указал тот факт, что между нейронами человеческого мозга и радиолампами существует некоторое сходство.

Вечером того же дня свет увидел очередной выпуск еженедельника *Time*, сообщивший читателям сенсационную новость: будущее уже наступило и первая в мире «думающая машина» уже построена! Причём не в MIT или Bell Labs, а в психиатрической больнице Барнвуд-хаус, расположенной в английской деревеньке неподалёку от Глостера, в которой майор медицинской службы Росс Эшби руководил исследованиями человеческой психики. Именно в этой провинциальной больнице Эшби и создал свой гомеостат. В интервью *Time* Эшби уверенно заявил, что его машина была *«наиболее близка к искусственному мозгу, чем всё когда-либо созданное человеком»* [1108].

Машина стала плодом пятнадцатилетних размышлений Эшби. Ещё два года потребовалось на её постройку, которая обошлась в 50 фунтов стерлингов. Гомеостат, первая версия которого была завершена в мае 1947 г., состоял из четырёх блоков, каждый из которых имел четыре «входных» контакта и один «выходной». Блоки объединялись в электрическую цепь таким образом, что напряжение на выходе каждого из них подавалось на вход и трёх других блоков, и его самого. Каждый из четырёх входов блока был оснащён переключателем полярности и реостатом, что позволяло регулировать сопротивление на входе, а также менять полярность входного напряжения

(фактически это означало, что у каждого блока было восемь настраиваемых параметров: четыре соответствовали положениям переключателей полярности, а ещё четыре — задаваемой величине сопротивления каждого из реостатов). После соответствующих трансформаций соответствующие каждому из входов провода переходили в установленную вертикально четверную обмотку электромагнита. Поверх обмотки располагалась установленная на игольчатой оси проволочная петля, на одном конце которой находился постоянный магнит, который, благодаря изгибу петли, оказывался внутри обмотки. Ввиду этого сама проволочная петля вела себя подобно стрелке компаса — угол её поворота менялся в зависимости от суммы токов, проходящих через обмотку. Если суммарное напряжение имело отрицательную полярность, то петля поворачивалась на своей оси в одну сторону (тем быстрее, чем больше была абсолютная величина напряжения), если же положительную — то в другую. На втором конце петли была закреплена пластинка, которая опускалась в полукруглый лоток, заполненный водой. К противоположным краям лотка были подведены источники напряжения таким образом, что напряжение на одном его краю составляло –2 вольта, а на другом — –15 вольт. В зависимости от угла поворота проволочной петли и, соответственно, от позиции пластинки в лотке на ней возникало напряжение, равное одному из промежуточных значений между напряжениями на краях лотка. Это напряжение передавалось затем на управляющую сетку триода, а усиленный триодом сигнал поступал на выход блока. В цепь триода был добавлен резистор, сопротивление которого подобрано таким образом, чтобы при нахождении пластинки в центре ванны напряжение на выходе блока было нулевым.

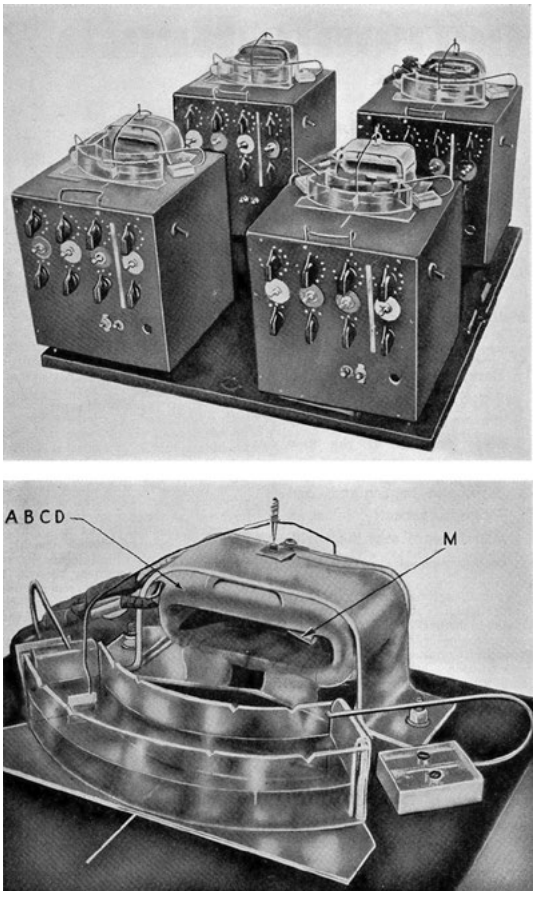


Рис. 91. *Вверху*: фотография гомеостата (четыре блока). *Внизу*: фотография отдельного блока. Буквами ABCD обозначена четверная обмотка электромагнита, буквой M — магнит

Таким образом, при нахождении всех пластин в центре соответствующих лотков вся система находилась в состоянии покоя. Однако стоило внести в неё некоторое возмущение (например, механически сместить одну из пластин, изменить какой-либо из параметров системы,

4.4.4

Первые эксперименты в области искусственных нейронных сетей

воспользовавшись переключателем полярности или реостатом на одном из входов какого-либо блока, либо вообще разрезать один или несколько проводов), как система выходила из состояния равновесия. Напряжение на выходе блока, в который было внесено «возмущение», становилось отличным от нуля, это ненулевое напряжение попадало на вход других блоков — и вся система начинала «жить своей жизнью».

И тут в дело вступала главная изюминка гомеостата. Как только выходное напряжение блока выходило за пределы диапазона, соответствующего отклонению проволочной петли от центрального положения более чем на 45°, срабатывал шаговый искатель (электромеханический аппарат, предназначенный для переключения пути следования тока в электрической цепи при поступлении управляющего электрического импульса), который добавлял в цепь на входе блока случайные сопротивления и случайно выбранные перемены полярности (вдобавок к установленным вручную). Наборы этих параметров, «зашитых» в шаговый искатель, были составлены на основе таблицы случайных чисел. Каждый шаговый искатель имел 25 возможных позиций, что давало в сумме $25^4 = 390\,625$ наборов параметров. Таким образом, выведенный из равновесия гомеостат начинал перебирать различные варианты параметров, пока не находил такой их набор, который позволял ему вернуться в состояние динамического равновесия (что, разумеется, гарантировалось не всегда, но в большинстве случаев происходило). Это свойство гомеостата Эшби назвал ультрастабильностью (или ультраустойчивостью) [ultrastability][1109, 1110, 1111, 1112, 1113, 1114, 1115, 1116].

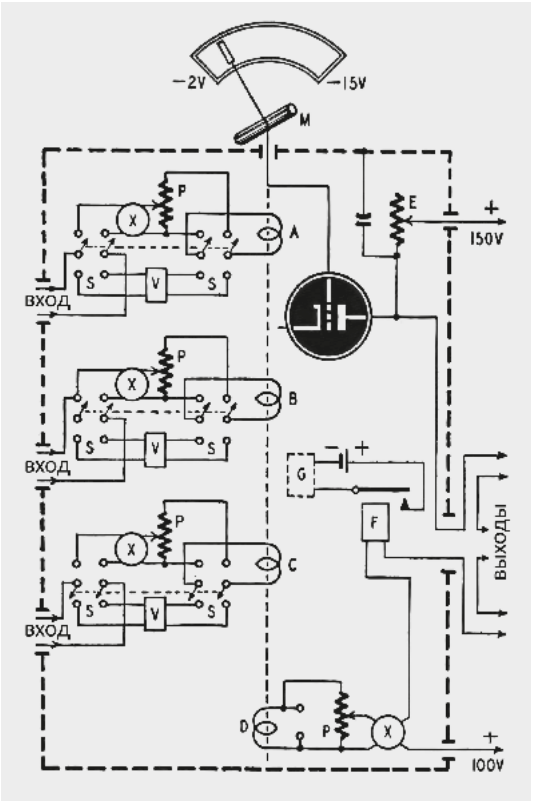


Рис. 92. Электрическая схема гомеостата

Хотя гомеостат и не умел распознавать котиков на картинках и даже искать путь в лабиринте, он был простой самообучающейся системой, причём обладающей довольно интересными свойствами. Во-первых, на примере гомеостата Эшби показал, что процесс поиска решения вполне может быть распределённым. В гомеостате нет какого-то главного управляющего элемента, его блоки идентичны и равнозначны. И тем не менее он в состоянии демонстрировать «ультрастабильное» поведение. Во-вторых, для каждого блока остальные блоки, в сущности, являются элементами внешней среды, поэтому

гомеостат, по сути, одинаково реагирует на внешние и внутренние возмущения: неважно, является ли причиной выхода из равновесия самопроизвольная поломка или воздействие среды. Элементы системы вовсе не обязаны содержать сведения об устройстве системы, чтобы система демонстрировала «ультрастабильное» поведение. Жизненно важным свойством является лишь наличие отрицательной обратной связи. Это были довольно интересные и не совсем очевидные результаты опытов с гомеостатом.

Можно ли было приспособить гомеостат для решения более привычных нам задач машинного обучения, таких, например, как задачи классификации? В принципе, да, но сделать это можно лишь довольно контринтуитивным способом. Например, «предъявлять» гомеостату различные прецеденты: факторы (допустим, что их три) в виде входных напряжений на три блока и метку класса в виде входного напряжения на четвёртый. Многократно пропустив таким образом обучающую выборку через гомеостат, можно дождаться, когда он придёт в состояние динамического равновесия (т. е. «научится» подбирать правильный ответ). Затем же, если предъявить ему лишь факторы (в виде напряжений на три блока), можно замерить степень отклонения от равновесия в четвёртом блоке (соответствующем метке класса). Эта величина, взятая с противоположным знаком, и будет ответом на задачу классификации. Конечно, гомеостат из четырёх блоков не годился для решения сколь-нибудь серьёзных задач, но сам Эшби видел в гомеостате прототип полноценного электронного мозга. Учёный не преминул поделиться своими провидческими соображениями с журналистами. Несложно догадаться, что произошло в результате.

Публикация в *Time* была не первым сенсационным сообщением о создании рукотворного мозга. Заголовок статьи в газете *Daily Herald* от 13 декабря 1948 г. прямо, без обиняков сообщал читателям: «Щёлкающий мозг умнее человеческого!» [The Clicking Brain Is Cleverer Than Man's][117]. Щелчки от переключения шаговых искателей гомеостата произвели на журналиста неизгладимое впечатление. *«Щелчки — это „мысли“ <…>*, — написал он. — *Машина всё время думает о своей задаче и поправляет себя».*

По мнению журналиста, машина была «всегда права» [always right] и «эгоистична» [it's selfish]. Не обошлось и без предсказания техноапокалипсиса: *«Однажды она [машина] может решить, что человеческий обслуживающий персонал ей больше не нужен».* Довершал мрачную картину заголовок следующей статьи, размещённой чуть ниже: «Проблемы, ещё больше проблем» [Trouble, More Trouble]. Вообще, вся полоса *Daily Herald* производила впечатление, что наш мир уже получил фатальную пробоину и скоро пойдёт на дно подобно «Титанику».

В научной среде появление гомеостата было воспринято более спокойно. Весной 1952 г. Эшби пригласили на очередную конференцию Мейси, где предложили выступить с докладом о полученных научных результатах. Среди слушателей были помимо прочих Уоррен Мак-Каллок, Уолтер Питтс, Маргарет Мид, Джулиан Бигелоу, Джерри Визнер и Артуро Розенблют. Самого

Винера, правда, на конференции не было. Выступление Эшби о гомеостате было включено в программу между докладом об эмоциях в контуре обратной связи и докладом об обучении осьминогов. Эшби привёз гомеостат с собой, чтобы продемонстрировать участникам конференции его возможности.

4.4.4

Первые эксперименты в области искусственных нейронных сетей

Выступление Эшби привело к серьёзной полемике, поскольку метод случайного поиска, положенный в основу системы, вызвал у многих участников вопросы. Мак-Каллок, Питтс и Бигелоу не были готовы признать, что такой неэффективный метод оптимизации можно было применять в системе, моделирующей работу мозга. Гомеостат «ощупывал» пространство параметров подобно слепому котёнку. Если бы в этом «механическом мозге» было не четыре нейрона, а гораздо больше, он вряд ли мог бы достигать стабильного состояния за разумное время[1118, 1119]. Впрочем, на деле гомеостат был всё-таки несколько сложнее, чем машина для демонстрации метода проб и ошибок. Рекуррентный характер связей в нём, а также гидродинамические эффекты, возникающие при движении пластинок в лотках с водой, и наличие толерантности (невосприимчивости) к определённым отклонениям от точки равновесия делали его поведение не совсем очевидным. В общем, Эшби прекрасно справился с задачей создания классического «чёрного ящика», способного решать некоторый класс задач на основе отрицательной обратной связи. В будущем учёные не раз предпринимали попытки создания более сложных вариантов гомеостата. А идея использования потенциометров в качестве модели синаптической связи в нейронной сети, как мы увидим позже, оказалась весьма плодотворной и не раз была использована при создании более поздних нейросетевых систем.

Вклад Эшби в развитие того направления науки, которое мы называем сегодня искусственным интеллектом, оказался в первую очередь философским и методологическим. Помимо идеи единства адаптирующейся системы и внешней среды, Эшби подчёркивал, что к мозгу следует подходить не только как к мыслящей, но и как к действующей машине. За одно только это утверждение его можно считать одним из основателей современного агентного подхода в ИИ. Возможно, именно поэтому Эшби предпочёл действовать там, где другие стремились сперва в полной мере осмыслить существующие проблемы, прежде чем приступить к созданию моделей. Унаследовали деятельный подход Эшби и его ученики. Например, Стаффорд Бир стал пионером в области создания кибернетических систем для управления хозяйственными процессами. Под его руководством в Чили во времена Сальвадора Альенде была начата работа над первым в мире проектом централизованного компьютерного управления плановой экономикой — знаменитым проектом «Киберсин» (Cybersyn).

Хотя участники девятой конференции Мейси и критиковали гомеостат Эшби, они не могли не понимать, что наличие какой-никакой действующей системы было серьёзным шагом вперёд. Полемика на конференции показала, что научное сообщество занято активным поиском механизмов, которые могли бы обеспечивать самообучение в нейросетевых моделях. Кроме того,

к 1952 г. гомеостат уже не был единственным устройством, претендующим на реализацию принципа самообучения.

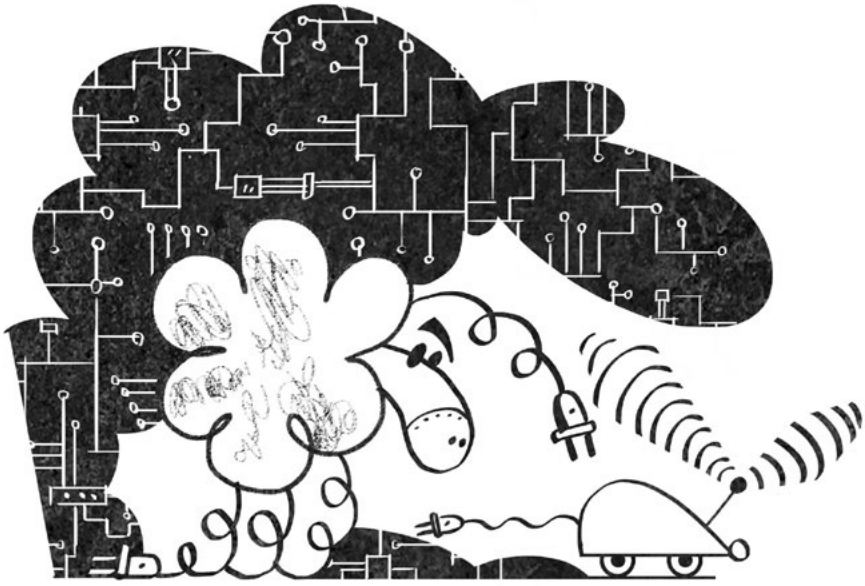
Практически одновременно с Эшби работу над собственной реализацией самообучающейся системы вёл другой классик кибернетики — нейрофизиолог Грей Уолтер.

Ещё в юности Уолтер познакомился с работами Ивана Павлова и его учеников. Влияние взглядов Павлова ясно прослеживается в дальнейших исследованиях Уолтера. Кроме того, он посетил лабораторию Ханса Бергера и позже сконструировал собственные улучшенные версии электроэнцефалографа, благодаря которым получил ряд важных научных и медицинских результатов[1120]. Сочетание интересов к изучению поведения живых существ, к электрической активности мозга и к электротехнике было весьма удачным для того, чтобы внести своё имя в список первопроходцев новой междисциплинарной области исследований.

Весной 1948 г. Уолтер начал работу над конструкцией «кибернетической черепахи». Первые экземпляры, получившие имена Элмер и Элси, были завершены к Рождеству 1949 г. Эти имена Грей составил из акронимов: ELectro MEchanical Robots, Light Sensitive with Internal and External stability [чувствительные к свету электромеханические роботы с внешней и внутренней стабильностью]. Уолтер считал Элмера и Элси представителями нового вида — Machina speculatrix [механизм изучающий]. По аналогии со своими машинами Уолтер присвоил «мыши» Шеннона видовое обозначение Machina labyrinthia, а гомеостату Эшби — Machina sopora [механизм спящий], подчёркивая постоянное стремление гомеостата к покою.

Каждая черепашка Уолтера двигалась на трёх колёсах, приводимых в движение двумя электромоторами, один из которых отвечал за передвижение, а второй — за рулевое управление. «Мозг» машины состоял из двух электронных ламп, которые, по словам Уолтера, служили эквивалентами двух нейронов. Машины были оснащены фотоэлементами, выполнявшими роль источника обратной связи. Обнаружив свет, черепашка двигалась к его источнику, но при превышении определённой яркости отходила назад. Также черепашки были снабжены ходовыми огнями. Изначально они были предназначены для того, чтобы сообщать наблюдателям о процессах, происходящих в «электронном мозге» машины. Но быстро выяснилось, что наличие собственного источника света порождало довольно интересные последствия. Если черепашка замечала себя в зеркале, то она начинала приближаться к изображению, но когда свет становился слишком ярким, то она начинала отходить. Если две черепашки находились в одной комнате и видели огни друг друга, то они тоже сначала начинали сближаться, но, как только оказывались слишком близко, отворачивали и расходились. Уолтер, любивший биологические аналогии, назвал это брачным танцем.

Если черепашка сталкивалась с препятствием, срабатывал датчик нажатия, который заставлял машину изменить направление движения. Когда заряд аккумулятора черепашки подходил к концу, она самостоятельно



отправлялась на подзарядку. В общем, её поведение выдавало в ней предка современных роботов-пылесосов. Поведение Элмера и Элси было полностью основано на заложенных в них «инстинктах», но для Уолтера это был только первый шаг в его экспериментах. Следующей «ступенью эволюции» стало появление Machina docilis [механизм обучаемый]. Идея заключалась в том, чтобы реализовать в машинах механизм формирования условных рефлексов. Там, где Павлов использовал собак, еду и звуки (а иногда и свет), Уолтер решил попытать счастья с кибернетическими черепахами, светом и свистком. «Мозгом» нового вида черепашек была схема CORA (COnditioned Reflex Analog, аналог условных рефлексов), распознававшая повторяющееся поступление одновременных сигналов по разным каналам. Фиксируя определённое количество повторений, CORA формировала связь стимула с результирующим поведением, что Уолтер описывал как аналог формирования условного рефлекса. Таким образом, черепашки обучались воспринимать звук свистка как свет и двигаться на свист даже при отсутствии света. CORA могла как выучить новое поведение, так и забыть его (т. е. если оператор «дразнил» черепашку, не включая свет при звуке свистка, то CORA вскоре отменяла установленную связь между событиями)[1121, 1122, 1123].

Демонстрация подобных устройств производила большое впечатление на современников, но необходимость менять аппаратное устройство машин для того, чтобы опробовать новые модели, существенно замедляла прогресс в области создания самообучающихся устройств. Поэтому некоторые исследователи решили прислушаться к совету Тьюринга и организовать эксперименты при помощи универсальных вычислительных машин.

В 1954 г. Бельмонт Фарли и Уэсли Кларк из MIT осуществили первые симуляции нейронных сетей при помощи цифрового компьютера. Фарли и Кларк

смогли обучить хеббовские сети (т. е. сети, обучение которых производится в соответствии с правилом Хебба), содержащие до 128 нейронов, для распознавания простых паттернов*. В ходе экспериментов они обнаружили, что случайное удаление по крайней мере до 10% нейронов в обученной сети не влияет на её способность успешно выполнять стоящую перед ней задачу[1124, 1125, 1126]. Это свойство искусственной нейронной сети напоминало способность мозга до некоторой степени переносить ущерб, причинённый хирургической операцией, несчастным случаем или болезнью.

В 1955–1956 гг. группа из исследовательской лаборатории IBM в Покипси (Нью-Йорк, США) под руководством Натаниэля Рочестера провела ряд вычислительных экспериментов с хеббовскими сетями, используя машину IBM 704, при этом размер сетей доходил до 512 нейронов. В ходе этих экспериментов было подтверждено формирование клеточных ансамблей в процессе хеббовского обучения[1127].

4.4.5 Перцептрон Розенблатта

Закономерным итогом ранних теоретических работ, а также первых экспериментов в области искусственных нейронных сетей стало появление перцептрона (*perceptron*, в русскоязычной литературе иногда используется альтернативное написание этого термина — «персептрон») — модели искусственной нейронной сети, опыты с которой были начаты в 1957 г. под руководством Фрэнка Розенблатта в Авиационной лаборатории Корнелла. Перцептроны Розенблатта отличались лишь в некоторых деталях от нейронных сетей, предложенных ранее Фарли и Кларком, а также рядом британских исследователей, таких как Реймонд Бёрл, Уилфред Тейлор и Альберт Аттли. Вклад Розенблатта заключался в развитии математического аппарата теории нейронных сетей, а также в обширных экспериментальных исследованиях в этой области. Именно Розенблатт, стремясь подчеркнуть особую важность связей между нейронами, изобрёл термин «коннекционизм», используемый сегодня для обозначения подхода в области искусственного интеллекта (а также когнитивистики, нейробиологии, психологии и философии сознания), в рамках которого мыслительные или поведенческие явления моделируются при помощи процессов, происходящих в сетях, состоящих из связанных между собой простых элементов (введённое позже более общее понятие «параллельная распределённая обработка» отражает тот факт, что в искусственных нейронных сетях и подобных им моделях большое количество относительно простых процессоров работает параллельно, и то, что сети хранят информацию распределённым образом).

* Паттерн (от англ. *pattern* — узор, шаблон, образец, схема) здесь часто означает образ, шаблон, повторяющийся элемент.

Розенблатт разделил нейронные сети на простые двухслойные (один слой для ввода, а второй для вывода; такой перцептрон он назвал α-перцептроном) и многослойные сети (с одним или несколькими промежуточными слоями). Он обобщил тип обучающей процедуры, использованной Фарли и Кларком при обучении двухслойных сетей, таким образом, чтобы её можно было применять и к многослойным сетям[1128].

Биография Розенблатта заслуживает подробного изложения.

Фрэнк Розенблатт родился 11 июля 1928 г. в городке Нью-Рошелле на юго-востоке штата Нью-Йорк. Основанный в 1688 г. гугенотами, бежавшими из Франции из-за религиозных преследований, город получил своё название в честь Ла-Рошели, откуда происходили многие колонисты.

Поэт Джим Монтегю запечатлел образ Нью-Рошелла того времени в стихотворении «Queen City of the Sound» (1926)[1129]. В начале 1930х гг. Нью-Рошелл был лидером по среднедушевым доходам населения в штате Нью-Йорк и занимал по этому показателю третье место в стране[1130].

Отец Фрэнка, Фрэнк Фердинанд Розенблатт, происходил из местечка Лабунь (ныне — Хмельницкая область Украины), находившегося на территории Российской империи. В юности Фрэнк Фердинанд участвовал в революционной деятельности и иммигрировал в США из-за угрозы ареста[1131]. Позже он стал известным экономистом и социологом, доктором Колумбийского университета, автором ряда научных трудов (например, фундаментального исследования по истории чартистского движения), редактором рабочих периодических изданий на идише и руководителем левой еврейской рабочей организации Arbeter Ring (Workmen's Circle, «Рабочий кружок»). После Первой мировой войны Фрэнк Фердинанд участвовал в качестве консультанта в восстановлении разрушенной войной экономики Австрии, занимал пост исполнительного директора Объединённого распределительного комитета американских фондов помощи евреям, пострадавшим от войны (American Jewish Joint Distribution Committee, «Джойнт»), а также основал небольшое издательство Frank-Maurice Inc.[1132, 1133] В апреле 1919 г. Розенблатт-старший занимался распределением гуманитарной помощи в Сибири и на Дальнем Востоке. Он пытался добиться прекращения еврейских погромов и пропаганды антисемитизма и, вопреки инструкциям «Джойнта», был вынужден неоднократно конфликтовать с американскими представителями в Сибири — дипломатами, военными, руководителями миссии Красного Креста, поддерживавшими правительство Колчака. Так, например, телеграмма Розенблатта в Нью-Йорк о еврейском погроме в Екатеринбурге, проведённом казаками, вызвала гнев генерального консула США в Омске Эрнеста Ллойда Харриса, который обвинил его в искажении фактов[1134]. Фрэнк Фердинанд Розенблатт скоропостижно скончался 7 ноября 1927 г., за восемь месяцев до рождения своего младшего сына.

Мать Фрэнка, Кэтрин Розенблатт, была социальным работником. Старший брат Фрэнка — Морис Розенблатт, в будущем известный американский политик, лоббист и консультант сенатора Ральфа Фландерса. Именно благодаря

усилиям Мориса удалось сместить сенатора Джозефа Маккарти с поста главы сенатских комитетов и прервать мрачную эпоху маккартизма [1135, 1136, 1137].

После окончания Высшей школы наук в Бронксе (Bronx High School of Science) [1138] в 1946 г. Фрэнк поступил в Корнеллский университет, где в 1950 г. получил степень бакалавра наук, а через шесть лет — степень доктора философии, защитив диссертацию «Расчёт K-коэффициента и пробное применение новой техники многомерного анализа» (The K-coefficient Design and Trial Application of a New Technique for Multivariate Analysis). После окончания учёбы Фрэнк стал сотрудником Авиационной лаборатории при Корнеллском университете и через некоторое время возглавил там секцию когнитивных систем [1139].

Именно в лаборатории Корнелла Розенблатт начинает свою работу над перцептронами. В январе 1957 г. секция Розенблатта публикует первый отчёт по проекту «Перцептрон: воспринимающий и распознающий автоматон» (The Perceptron: A Perceiving and Recognizing Automaton, далее PARA) [1140], и в том же году Розенблатт выступает с докладом о перцептроне на XV Международном конгрессе по психологии, проходившем с 28 июля по 5 августа в Брюсселе [1141].

В отчёте по проекту PARA Розенблатт впервые приводит определение перцептрона, а также вводит несколько дополнительных терминов:

Недавние теоретические исследования, проведённые автором, показывают, что целесообразно создать электронную или электромеханическую систему, которая научится распознавать наличие сходства или тождества между образцами оптической, электрической или тональной информации способом, который может быть очень похож на процессы восприятия биологического мозга. Предлагаемая система основывается на вероятностных, а не на детерминистических принципах в своей работе и обретает надёжность благодаря свойствам статистических измерений, полученных из больших совокупностей элементов. Система, которая работает в соответствии с этими принципами, будет называться перцептроном. Модель, которая предназначена для приёма оптических или визуальных изображений в качестве входных данных, будет называться фотоперцептроном. Та [модель], которая принимает тональные паттерны или звуковые входы, будет называться фоноперцептроном, и мы также рассматриваем в перспективе возможность использования электро- или радиоперцептронов с соответствующими сенсорными устройствами. Также полезно различать перцептроны с моментальными стимулами и перцептроны для временных последовательностей — последние имеют способность запоминать последовательности событий, а не кратковременные мгновенные изображения, например полученные из коллекции отдельных кадров, вырезанных из полосы киноплёнки.

В примечаниях к отчёту говорится, что работы по «теории статистической разделимости», которые легли в основу предлагаемой конструкции фотоперцептрона, были начаты автором пятью годами ранее. Для постройки

первого фотоперцептрона предлагается задействовать на полтора года штат из трёх необходимых сотрудников-профессионалов, а также цифровую вычислительную машину с персоналом.

Во многих поздних исследованиях первый перцептрон Розенблатта (далее мы будем использовать для ссылки на архитектуру, лежащую в его основе, термин «элементарный перцептрон») называют однослойным, изобретение же многослойного перцептрона Розенблаттом относят к более позднему периоду. В действительности дело обстоит несколько сложнее. Фотоперцептрон, описанный в отчёте по проекту PARA, представляет собой машину, состоящую из трёх слоёв элементов: *S* (сенсорного), *A* (ассоциативного) и *R* (реагирующего). При этом синаптические веса только одного слоя ($A \to R$) подвергаются коррекции в процессе обучения. Однако слой $S \to A$ также содержит веса, значения которых могут быть равны строго 1 (возбуждающий синапс) или –1 (тормозящий синапс). Эти веса конфигурируются вручную[1142].

Это может показаться простым рудиментом модели Мак-Каллока и Питтса, хотя на деле этот слой выполняет важную функцию, о которой мы поговорим позже.

В выпущенном ещё через четыре года работы отчёте «Принципы нейродинамики: перцептроны и теория механизмов мозга» (Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms, 1961), систематизирующем итоги исследований, Розенблатт отводит целый раздел для описания «трёхслойных систем с переменными *S* — *A* связями», прежде чем перейти к описанию «многослойных перцептронов и перцептронов с перекрёстными связями». Розенблатт не только описывает подобные архитектуры, но и предлагает алгоритмы для их обучения. Кроме того, он показывает, что многослойные сети необязательно сходятся при использовании детерминистических алгоритмов обучения, поэтому при обучении таких систем необходимо задействовать стохастические, то есть включающие в себя элемент случайности, алгоритмы[1143]. В целом эта работа Розенблатта во многом опередила время. Удивительную мощь, заложенную в алгоритмах почти шестидесятилетней давности, можно наблюдать в ряде современных экспериментов.

В 1998 г. был опубликован набор данных MNIST (Modified National Institute of Standards and Technology database, Модифицированная база данных Национального института стандартов и технологий), содержащий 70 000 чёрно-белых изображений рукописных цифр (60 000 в обучающей выборке и 10 000 в тестовой) размером 28 × 28 пикселей и соответствующих им меток. Изображения были получены путём сканирования цифр, написанных сотрудниками Американского бюро переписей и простыми американскими школьниками[1144]. MNIST на многие годы стал одним из наиболее популярных наборов данных для оценки возможностей различных моделей для распознавания образов. В 2001 г. группа исследователей под руководством Эрнста Куссуля провела эксперименты по обучению на MNIST трёхслойных розенблаттовских перцептронов с различным количеством элементов в *A*-слое (входной

БЕБРА
ОСЛОМ

слой нейронов перцептрона Розенблатт называл *S*-слоем от *sensory* — сенсорный, воспринимающий; выходной — *R*-слоем от *response* — ответ, реакция; все промежуточные слои назывались *A*-слоями от *associative* — ассоциативный). Во времена Розенблатта технические возможности позволяли работать с перцептронами, содержащими в *A*-слое до нескольких сотен элементов. В работе Куссуля их число удалось довести до 512 000. При этом была достигнута точность распознавания в 99,2%, что сопоставимо с лучшими моделями начала XXI в.[1145] Конечно, MNIST является тривиальной задачей для современных нейросетевых архитектур, и по данным на 2019-й точность распознавания превысила 99,7% (при этом корректность меток в ошибочно распознаваемых изображениях нередко подвергается сомнению), поэтому для тестирования возможностей систем распознавания образов давно применяют куда более изощрённые наборы данных. Но всё же результат, показанный «ископаемой» моделью Розенблатта, получившей своеобразный допинг в виде доступных в наши дни вычислительных ресурсов, вполне можно считать доказательством того, что его идеи во многом опередили время.

Первые нейрокомпьютеры 4.4.6

Первая версия перцептрона была смоделирована при помощи компьютера IBM 704. Обучившись, программа Розенблатта была способна успешно распознавать различные геометрические фигуры (круги, квадраты, треугольники). Успешные эксперименты с цифровой машиной привели к созданию аппаратной версии перцептрона — первого в мире нейрокомпьютера Mark I Perceptron.

Рис. 93. Фрэнк Розенблатт и нейрокомпьютер Mark I Perceptron

Эта работа Розенблатта дала начало новому направлению в вычислительной технике — нейроморфной инженерии.

Дело в том, что при симуляции нейронных сетей при помощи компьютеров с фон-неймановской архитектурой возникает нежелательный эффект, получивший в 1977 г. с лёгкой руки Джона Бэкуса наименование «бутылочное горлышко фон Неймана» [von Neumann bottleneck][1146]: поскольку в этой архитектуре программы и данные хранятся в памяти, процессор и память разделены и данные пересылаются между ними при помощи соединительной шины, то это приводит к возникновению задержек. Независимо от того, насколько быстро может работать процессор, на деле он ограничен скоростью передачи данных, являющейся узким местом архитектуры. В биологических нейронных сетях нейроны выполняют одновременно функции хранения и обработки данных. Данные, воплощающиеся

в пороге активации нейрона и параметрах синаптических связей, не требуют пересылки по перегруженной общей шине устройства. При симуляции нейронной сети фон-неймановская машина вынуждена выполнять расчёт сигналов в каждом нейроне последовательно, что сильно замедляет процесс симуляции. Даже в современных параллельных архитектурах число вычислительных ядер на порядки меньше количества ячеек памяти. Чтобы преодолеть это неприятное ограничение, необходимо создание машин с принципиально иной архитектурой. Те архитектуры, которые подражают строению биологических нейронных сетей, называют нейроморфными. Более подробно мы поговорим о них позже, когда будем обсуждать современные проекты в этой области.

Конечно, и архитектура фон Неймана в некотором роде подражает человеческому мозгу. Ведь она была создана фон Нейманом в том числе под влиянием работ Мак-Каллока и Питтса. Поэтому граница между классическими и нейроморфными архитектурами в какой-то степени условна. Можно говорить о той или иной степени нейроморфности какой-либо архитектуры. Но всё же в большинстве случаев более или менее очевидно, к какому именно из полюсов тяготеет то или иное устройство.

Розенблатт не был единственным исследователем, проводившим на стыке 1950-х и 1960-х гг. опыты в области создания нейроморфных машин. В 1960 г. профессор Бернард Уидроу и его аспирант Тед Хофф из Стэнфордского университета разработали ADALINE (Adaptive Linear Neuron, или позднее Adaptive Linear Element, адаптивный линейный нейрон / адаптивный линейный элемент) — однослойную искусственную нейронную сеть и физическое устройство, реализующее эту сеть, основанное на элементах, получивших название «мемисторы» (не путать с мемристорами!).

Сначала Уидроу, как и Розенблатт, моделировал нейронную сеть при помощи потенциометров — переменных резисторов, регулируя сопротивление каждого из них вручную. Но для того, чтобы реализовать в такой схеме возможность самообучения, необходимо было осуществлять вращение ручек автоматически. В этой ситуации Розенблатт сделал ставку на использование электромоторов. Уидроу же ухватился за идею, подсказанную ему Норманом Абрамсоном из Гавайского университета. *«Почему бы не сделать это химически, электрохимически,* — сказал Абрамсон своему коллеге в одном из разговоров, — *как это делается в мозге?»*

Основываясь на этой идее, Уидроу придумал принципиальную схему устройства, названного мемистором (от *memory* — память и *resistor* — резистор, поскольку по сути элемент был резистором с памятью).

По замыслу Уидроу, мемистор должен был представлять собой банку, наполненную электролитом, с двумя погружёнными в неё электродами. Чтобы изменять сопротивление между ними, Уидроу предполагал использовать третий электрод, подведение тока к которому должно было каким-то образом менять химический состав раствора и тем самым изменять его сопротивление. Однако конкретных мыслей о том, какие химические вещества

использовать, на какую именно реакцию полагаться и как быстро можно изменять сопротивление, у учёного не было.

На помощь пришёл Тед Хофф, который хорошо разбирался в химии. Хофф сразу понял, что будет очень сложно изменить сопротивление электролита. Вместо этого он предложил использовать гальванизацию.

4.4.6

Первые нейрокомпьютеры

Хофф и Уидроу взяли лист бумаги, мягкий карандаш, провели на листе линию длиной несколько сантиметров и при помощи омметра замерили её сопротивление. Затем они взяли немного раствора сульфата меди в серной кислоте и нанесли его поверх графитной линии — после добавления электролита сопротивление уменьшилось в 1000 раз. После этого они погрузили в нанесённый на поверхность линии раствор медный электрод и, пропустив ток, смогли добиться осаждения небольшого количества меди поверх графита, что снизило сопротивление ещё примерно в 100 раз.

Исследователи хотели добиться обратного эффекта (удаления меди с поверхности) путём обращения направления электрического тока, но, пока они возились с оборудованием, кислота проела бумагу, и вся конструкция развалилась. Однако сам принцип уже был понятен, и Уидроу принялся за дело. Он взял омметр и отправился с ним в книжный магазин. Подойдя к прилавку, он сказал продавщице:

— Я хотел бы купить грифели для карандашей!

— Да, сэр. Посмотрите в витрине, там полно разных типов грифелей.

— Я хотел бы купить тот, который имеет самое высокое электрическое сопротивление.

— Прошу прощения?..

Уидроу вкратце обрисовал продавщице суть, она вытащила грифели из коробки и позволила ему заняться измерениями. Победителем стал грифель Fineline Type H, предназначенный для механического карандаша, — он выдал рекордные 9 Ом от одного конца до другого. Уидроу и Хофф взяли этот грифель, поместили один конец грифеля в зажим, окунули другой конец в раствор сульфата меди в серной кислоте, погрузили туда медный электрод и включили электрический ток. Вытащив и ополоснув грифель, учёные увидели отличное покрытие из меди на его кончике — твёрдое как камень.

Затем таким же образом медь была нанесена на другой конец грифеля. Экспериментаторы припаяли к медным оконцовкам грифеля два куска провода с пластмассовой изоляцией, покрыли места пайки лаком для ногтей, который Уидроу попросил у жены, — это было сделано, чтобы припой не растворился в серной кислоте. Затем учёные поместили грифель в лабораторную пробирку (оставив концы проводов снаружи), туда же опустили оголённый медный провод и наполнили пробирку уже знакомым раствором. В итоге у них получилось устройство с тремя выведенными наружу электрическими контактами. Подавая в разных направлениях ток между медным проводом и грифелем, можно было добиваться как осаждения меди на поверхности грифеля, так и её удаления оттуда, что позволяло изменять сопротивление грифеля в пределах от 9 до 0,25 Ом.

Именно из таких элементов и был собран ADALINE. Обучение было организовано при помощи несложной электросхемы, реализующей алгоритм, получивший название LMS (Least Mean Squares, алгоритм наименьших средних квадратов)[1147], — один из ранних вариантов стохастического градиентного спуска[1148]. Информация, накопленная искусственными нейронами ADALINE, была воплощена в различной толщине слоя меди на поверхности графитных стержней.

Позже в одном из интервью Уидроу так описывал события того времени: *«Мы знали о Розенблатте только из газетных заметок о его работе. Она была сенсационной темой для прессы. Через некоторое время и наша работа также стала сенсационной. Некоторые из людей, занимающихся в Стэнфорде связями с общественностью, однажды организовали мою пресс-конференцию. Там была целая комната, полная репортёров, и я демонстрировал самообучающуюся машину. Это было довольно удивительно для 1960 года. Никто не знал, что это, чёрт возьми, такое и что можно с этим делать. Мы тоже не знали, что с этим можно делать»*[1149].

Как в перцептроне Розенблатта, так и в ADALINE искусственный нейрон выполняет две операции: суммирование входящих сигналов и подстановку их в некоторую функцию, называемую пороговой функцией или функцией активации. В качестве пороговых Розенблатт и Уидроу использовали функции, которые могли принимать одно из двух значений (обычно 0 или 1). Если аргумент функции превышал некоторое пороговое значение, то сама она принимала значение, равное верхнему порогу (обычно 1), в противном случае — нижнему порогу (обычно 0). Пороговая функция в перцептроне и ADALINE служила заменой условия срабатывания нейрона в сетях Мак-Каллока и Питтса. Нейрон Мак-Каллока и Питтса активируется в случае, если число возбуждающих сигналов превышает некоторое пороговое значение (при отсутствии тормозящих сигналов). Единственным важным отличием сетей Розенблатта и Уидроу стал факт появления синаптических весов (или коэффициентов), на которые умножался сигнал при прохождении через соответствующее соединение нейронов. Таким образом, сигналы в сетях Розенблатта и Уидроу перестали быть аналогами логических суждений «истина» или «ложь» и стали численными значениями.

Как перцептрон Розенблатта, так и ADALINE обучались при помощи сходных алгоритмов, сегодня известных под названием «метод коррекции ошибки». Подробнее этот подход мы рассмотрим позже, когда будем говорить о теореме о сходимости перцептрона. Отметим лишь, что, в отличие от перцептрона Розенблатта, в ADALINE для вычисления величины ошибки использовалось значение сигнала до прохождения его через функцию активации. Многослойная версия ADALINE вполне ожидаемо получила название MADALINE.

Группы Розенблатта и Уидроу были не единственными командами учёных, кто занимался созданием коннекционистских моделей в те годы. В конце 1950-х — начале 1960-х гг. над созданием модели, похожей на перцептрон

4.4.6 Первые нейрокомпьютеры

и ADALINE, работал немецкий информатик Карл Штейнбух (собственно, он и придумал немецкий термин *Informatik* — информатика, который затем перекочевал в русский язык, благодаря чему сегодня мы можем обойтись одним словом «информатика» вместо двух английских *computer science*). Алгоритм, созданный Штейнбухом, получил название Lernmatrix — матрица обучения. В конце 1968 г. в Технологическом институте Карлсруэ под руководством Штейнбуха на основе Lernmatrix был создан первый европейский нейрокомпьютер.

Система состояла из двух модулей. Модуль ввода был «глазами» устройства и представлял собой набор фотоэлементов. Сигналы, полученные фотоэлементами, обрабатывались при помощи обучаемой матрицы на базе реле. В своих экспериментах Штейнбух продемонстрировал, что система была способна распознавать изображения пяти гласных букв [1150, 1151].

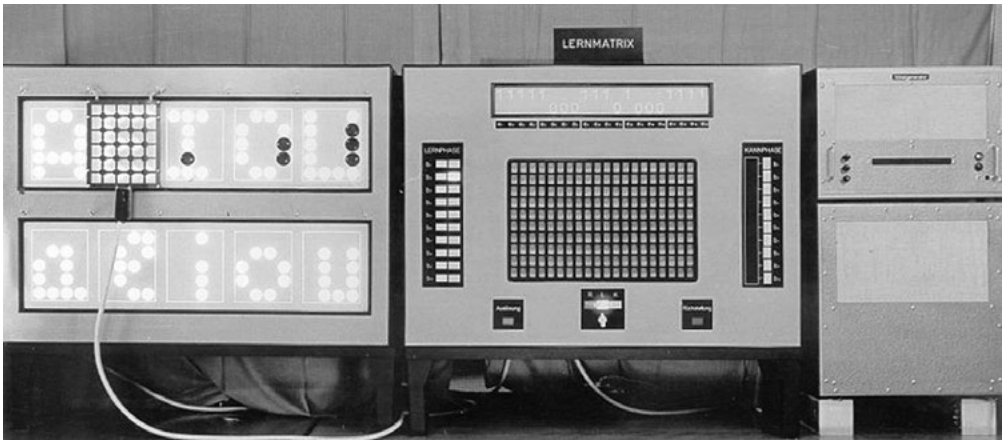


Рис. 94. Нейрокомпьютер Lernmatrix. В левой части происходит сканирование изображения при помощи матрицы из двадцати фотоэлементов, в среднем блоке идёт обработка, справа расположен блок акустического вывода

Перцептрон Розенблатта был устроен похожим образом. Входные данные поступали в него при помощи модуля ввода, в котором входное изображение подсвечивалось мощным источником света и проецировалось на матрицу размером 20 × 20 фотоэлементов на основе сульфида кадмия. Перцептрон также имел коммутационную панель, которая позволяла формировать конфигурацию возбуждающих и тормозящих синаптических связей [1152].

Первые нейрокомпьютеры были способны решать несложные задачи по распознаванию образов, успешно не только определяя геометрические фигуры и символы, но и, например, отличая фотографии женщин от фотографий мужчин.

К сожалению, в большинстве случаев до нас не дошли ни наборы данных, на которых производилось тестирование этих устройств, ни полученные значения метрик точности распознавания, однако, основываясь на общих представлениях о возможностях столь небольших по современным меркам моделей, можно предположить, что результаты были довольно скромными. В сборнике *Naval Research Reviews* за 1960 г. говорится, что при распознавании символов перцептрон Розенблатта правильно распознавал буквы в 85% случаев [1153].

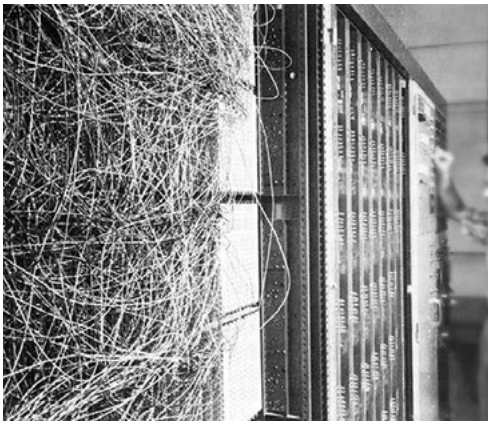


Рис. 95. Перцептрон Розенблатта. Провода — синапсы, соединяющие *A*- и *S*-слои

Нейросетевые исследования 1960-х годов 4.4.7

Успехи Розенблатта привели к возникновению проектов, направленных на улучшение достигнутых им результатов. В Стэнфордском исследовательском институте (Stanford Research Institute, SRI) в Менло-парке (штат Калифорния) Чарльз Розен возглавил лабораторию, которая пыталась вытравить микроскопические вакуумные трубки на твердотельной подложке. Розен предположил, что схемы, основанные на таких трубках, могут воплощать принципы, изучаемые Розенблаттом, поэтому институт нанял его в качестве консультанта. В 1960 г. команда из лаборатории Розена под руководством учёного с говорящей фамилией, Альфреда Брейна *, почти завершила сборку небольшой нейронной сети под названием MINOS **. Брейн понимал, что компьютерное моделирование нейронных сетей было слишком медленным для практического применения, поэтому принял решение о создании специализированного вычислительного устройства. Элементной базой MINOS стали разработанные Брейном магнитные устройства, позволяющие изменять веса связей нейронной сети.

Розенблатт заинтересовался возможностью замены громоздких потенциометров с электромоторами на магнитные устройства Брейна, поэтому охотно подключился к проекту SRI.

В 1961 г. команда Брейна начала работу над созданием нового большого нейросетевого устройства под названием MINOS II. В том же году Нильс Нильссон по приглашению Розена присоединился к Группе по самообучающимся машинам (Learning Machines Group), а затем возглавил её.

С 1958 по 1967 г. работу над системами MINOS финансировал в первую очередь Корпус войск связи Армии США. Целью проекта было «произвести научное исследование и экспериментальное изучение методов и характеристик оборудования, пригодного для практического применения в целях графической обработки данных для военных нужд». Основным направлением проекта было автоматическое распознавание символов на военных картах. Также были предприняты попытки применения разработанных устройств для других задач, таких как распознавание военных транспортных средств (например, танков) на аэрофотоснимках и распознавание рукописного текста.

На первом этапе обработки в MINOS II входное изображение дублировалось сто раз с помощью матрицы пластиковых линз размером 10 × 10. Каждая из копий изображения пропускалась через собственную оптическую маску (пластинку, состоящую из прозрачных и непрозрачных областей) для обнаружения различных признаков, а затем свет, прошедший через маску, регистрировался фотоэлементом и сравнивался с пороговым значением.

* Brain (*англ.*) — мозг.

** В греческой мифологии Минос был сыном Зевса и Европы и властителем Крита, а после смерти стал одним из трёх судей в подземном мире.

Результатом был набор из ста двоичных значений. Эти значения были входными данными для ассоциативного слоя, представлявшего собой набор из 63 искусственных нейронов[1154].

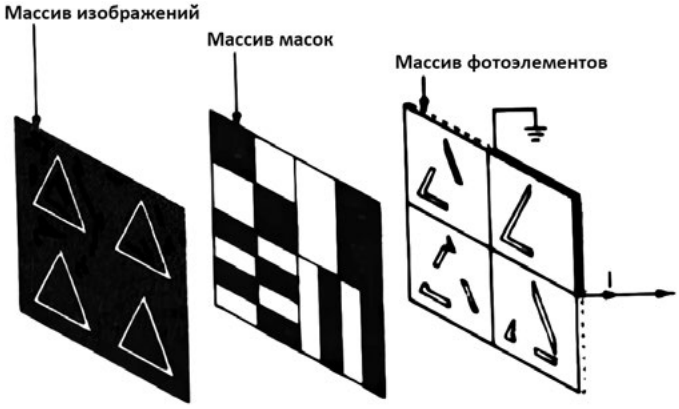


Рис. 96. Схема обработки изображений в MINOS II

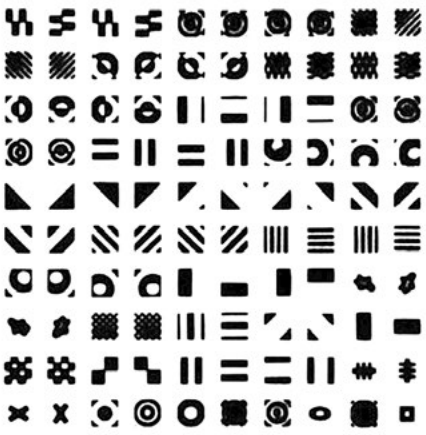


Рис. 97. Варианты оптических масок в MINOS II

Каждому из ста входных значений соответствовал один из ста переменных магнитных весов; 63 двоичных выхода из этих нейронов затем использовались для принятия решения о принадлежности изображения к одной из категорий. В зависимости от решаемой задачи это делалось разными способами. Например, при распознавании условных обозначений на картах нейроны организовывались в девять «комитетов» по семь нейронов, при этом каждый «комитет» соответствовал одному из девяти распознаваемых классов символов[1155]. При использовании набора из 64 классов в 63-мерном пространстве, каждое из измерений в котором соответствовало ответу одного из нейронов, располагались 64 равноудалённые друг от друга точки, а нейронная сеть обучалась таким образом, чтобы точка, соответствующая её выходным значениям, была расположена ближе к точке, соответствующей верному классу, чем к точкам, соответствующим другим классам.

В принципе, наличие 63 нейронов позволяло довести число распознаваемых категорий до 2^{63}. Однако, поскольку на практике число категорий было значительно меньше, создатели MINOS разработали целую теорию[1156],

позволяющую оптимальным образом комбинировать ответы 63 нейронов для того, чтобы решать задачу классификации с числом классов от 2 до 2^{63}.

В течение 1960-х гг. Группа по самообучающимся машинам исследовала множество различных нейросетевых архитектур и процедур обучения. По мере того как компьютеры становились всё более доступными и мощными, всё чаще использовалась симуляция сетей на цифровых машинах. Комбинация новой машины SDS 910 и последней версии устройства ввода получила название MINOS III.

Одним из наиболее успешных результатов, достигнутых при помощи этой системы, стало автоматическое распознавание текстов программ на фортране, написанных от руки печатными буквами. Над этой задачей работали Джон Мансон, Питер Харт и Ричард Дуда. Нейросетевая часть MINOS III использовалась для оценки гипотез относительно каждого из распознаваемых символов. Например, некоторый символ, по мнению сети, со степенью уверенности в 90% является символом «D», а со степенью уверенности 10% — символом «O». Однако, выбирая каждый раз гипотезу с наибольшим значением степени уверенности, в итоге можно получить строку, в которой будет содержаться одна или несколько ошибок, поскольку точность распознавания всё же не была идеальной. С увеличением количества символов в строке вероятность того, что в неё закрадётся хотя бы одна ошибка, быстро растёт. Когда человек читает текст, написанный на бумаге, он может угадать плохо читаемый символ из контекста. Например, если в обычном тексте в слове «ЗДРА?СТВУЙТЕ» в отношении пятого символа лидирует гипотеза, что это цифра 8, и лишь затем следует гипотеза, что это буква В, то мы всё-таки понимаем из контекста, что вариант с «В» более предпочтителен.

Исследователи из SRI использовали для решения этой проблемы метод, называемый динамическим программированием. Использование этого метода позволяло рассчитать степень уверенности для строки в целом, основываясь на статистических свойствах распознаваемых текстов. Этот подход применяется в задачах распознавания текста и в наши дни. В результате исследователям удалось достичь точности распознавания в 98% для большого набора рукописных текстов, не использовавшихся в процессе обучения модели. Распознавание с таким уровнем точности было значительным достижением для 1960-х гг.

Расширяя круг интересов за пределы нейронных сетей, Группа по самообучающимся машинам в конечном итоге стала Центром искусственного интеллекта SRI, который и сегодня продолжает оставаться одним из ведущих исследовательских центров в области искусственного интеллекта[1157]. В конце 1960-х гг. Группа из SRI перенесла фокус своих исследований в сферу мобильной робототехники. Появившийся вскоре робот Шейки (Shakey) ознаменовал собой начало этого нового направления. Такое имя робот получил из-за специфического подрагивания*, которое демонстрировал во

* Shake (*англ.*) — дрожь.

время работы. Шейки стал первым универсальным мобильным роботом, сочетавшим в себе компьютерное зрение, планирование и выполнение движения[1158]. Впрочем, система зрения Шейки не имела никакого отношения к перцептронам — в её основу было положено преобразование Хафа [Hough Transform][1159] — алгоритм, применяемый для выделения отдельных геометрических элементов изображения.

4.4.8 Теоретические результаты

Итогом работы Розенблатта и его коллег, помимо практических, стал ряд важных теоретических результатов. К их числу относятся, в частности, формулировка и доказательство теоремы о сходимости перцептрона. Как и теореме Цермело, теореме Розенблатта не слишком повезло, поскольку многие современные источники содержат неверную или избыточную формулировку теоремы. Тем, кто интересуется формальной математической стороной вопроса, я рекомендую небольшое расследование[1160], проделанное на эту тему Леем Мао, а мы попробуем взглянуть на сформулированную Розенблаттом проблему в более неформальном ключе.

Любую задачу классификации с произвольным числом классов можно свести к решению одной или нескольких задач, в которых число классов равно двум. Например, если у нас есть задача распознавания на картинке котиков, собак и енотов, то мы можем представить её в виде совокупности двух задач: задачи «отличать котиков от всех прочих животных» и задачи «отличать собак от енотов». Воспользовавшись этой особенностью задач классификации, мы будем рассматривать задачу с двумя классами. Её можно легко представить в графической форме. Для этого нужно взять n-мерное евклидово пространство, где n — количество факторов, задействованных в задаче (т. е. при одном факторе это будет числовая прямая, при двух факторах — плоскость, при трёх — трёхмерное пространство и т. д.), и отобразить в нём известные нам прецеденты (элементы обучающей выборки) в виде точек двух цветов (скажем, красных и зелёных). В случае задачи с двумя факторами мы получим множество красных и зелёных точек на плоскости. Если зелёные точки можно отделить от красных, проведя на плоскости некоторую прямую (для большего числа факторов — проведя в пространстве некую гиперплоскость), то множества красных и зелёных точек называют линейно разделимыми.

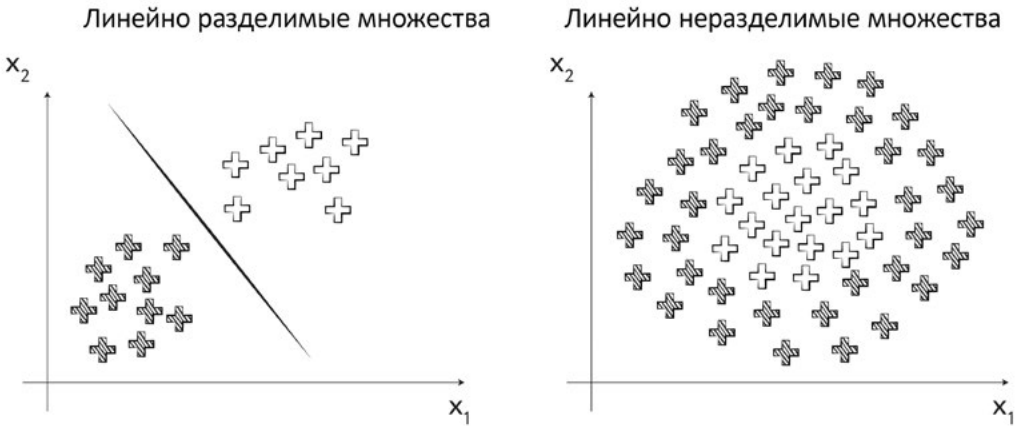


Рис. 98. Примеры линейно разделимых и линейно неразделимых множеств

Перцептрон, имеющий только один слой нейронов с настраиваемыми синаптическими весами, является линейным классификатором, то есть в процессе обучения он пытается найти гиперплоскость, разделяющую прецеденты, относящиеся к различным классам. Смысл теоремы о сходимости перцептрона заключается в том, что (как удалось доказать Розенблатту) такой однослойный перцептрон, обучаемый при помощи метода коррекции ошибки, всегда, независимо от стартового состояния синаптических весов и последовательности поступления элементов обучающей выборки, достигнет решения за конечный промежуток времени — то есть для линейно разделимых классов решение всегда будет найдено за конечное количество шагов обучения. Кроме того, Розенблатт рассчитал верхний предел количества таких шагов. Помимо теоремы о сходимости перцептрона, Розенблатт также представил доказательства ряда смежных теорем, связанных с архитектурой искусственных нейронных сетей и методами их обучения.

Впрочем, первые кирпичики в математический фундамент коннекционизма, как это ни странно, были заложены математиками, казалось бы далёкими от проблематики искусственных нейронных сетей. Речь идёт о решении так называемой тринадцатой проблемы Гильберта советскими математиками Владимиром Арнольдом и Андреем Колмогоровым. Гильберта интересовал вопрос о том, можно ли представить решение общего уравнения седьмой степени в виде суперпозиции непрерывных функций двух переменных[1161]. Арнольду и Колмогорову удалось доказать эту проблему в более общем виде, результатом чего стало появление теоремы Арнольда — Колмогорова, которая гласила: любая многомерная непрерывная функция может быть представлена в виде суперпозиции непрерывных функций одной переменной. В некотором роде советские математики показали, что единственная «истинная» функция многих переменных — это сложение, поскольку все другие функции можно записать с использованием функций одной переменной

и сложения. Но ведь искусственная нейронная сеть как раз и представляет собой сочетание сложения, которое выполняют нейроны, и подстановки, которой соответствует передача сигнала через синаптическую связь. Таким образом, из теоремы Арнольда — Колмогорова следует, что абсолютно любая многомерная непрерывная функция может быть реализована при помощи искусственной нейронной сети[1162].

Этот результат был довольно неожиданным, поскольку, согласно ему, вся сложность многомерных функций может быть сведена к тривиальным операциям одномерных функций. В результате становится возможным использование методов групповой подстройки множеств однородных параметров для моделирования плохо формализуемых механизмов и процессов.

Статьи Колмогорова и Арнольда были опубликованы в СССР в 1956–1957 гг., но английские их версии появились в печати только в начале 1960-х гг. Поэтому Розенблатт, начиная свою работу над перцептронами, скорее всего, ничего не знал о неожиданном и обнадёживающем результате, полученном советскими математиками. И всё-таки именно ему, скромному нейрофизиологу, а вовсе не математикам и информатикам удалось оказаться в нужное время в нужном месте и стать на некоторое время лидером нового направления в науке, обильные плоды которого мы пожинаем в наши дни. Розенблатт был в некотором роде математиком поневоле, его практические эксперименты нередко оказывались впереди попыток строгого математического обоснования методов, лежащих в их основе. Да и сами математические выкладки Розенблатта, по мнению некоторых специалистов, не всегда были корректны. И всё-таки именно в руках этого худощавого юноши в очках были рабочий образец самообучающейся машины и обнадёживающие результаты экспериментов.

Фрэнк Розенблатт был весьма разносторонней личностью. Будучи руководителем отдела когнитивных систем в Корнелле, он читал лекции на факультете психологии. Его курс под названием «Теория механизмов мозга» был рассчитан на студентов как инженерных, так и гуманитарных факультетов и включал в себя огромное число сведений из различных областей знаний. Здесь были и результаты, полученные во время операций на мозге больных эпилепсией (при нахождении пациентов в сознании), и эксперименты по изучению активности отдельных нейронов зрительной коры кошек (речь идёт о работах Дэвида Хьюбела и Торстена Визеля — их мы обсудим более подробно немного позже), и работы по изучению изменений в протекании психических процессов в результате травм различных областей мозга, принципы работы различных электронных устройств, моделирующих поведение биологических нейронных сетей (в том числе перцептрона).

Несмотря на то что в те годы в арсенале нейронауки не было ещё таких современных методов, как компьютерная и позитронно-эмиссионная томография, Розенблатт смог дать вполне адекватные оценки возможностей человеческого мозга. Например, основываясь на доступных ему данных, он произвёл серию вычислений и пришёл к выводу, что нейронных связей

в коре головного мозга человека достаточно для того, чтобы хранить точные «фотографические» образы, поступающие от органов зрения со скоростью 16 кадров в секунду, в течение не менее двухсот лет.

Именно на основе этого курса была написана книга «Принципы нейродинамики», которую Розенблатт использовал затем в качестве учебника для студентов.

Друзья, увлечения и крысы Розенблатта 4.4.9

Розенблатт определённо выделялся из коллектива преподавателей Корнелльского университета тех лет. Он был весьма обаятельным, но довольно застенчивым, по воспоминаниям коллег, человеком. Розенблатт виртуозно водил спортивный автомобиль MGA, его верным спутником был кот по имени Тобермори. Так звали подопытного кота из рассказа Гектора Хью Манро (более известен под псевдонимом Саки); кот из рассказа смог научиться человеческой речи, именно поэтому то же имя — Тобермори — Розенблатт дал своему последнему нейросетевому проекту — фоноперцептрону Tobermory.

Подробности личной жизни Розенблатта были практически неизвестны биографам вплоть до выхода в свет мемуаров его бывшего аспиранта Хэла Седжвика. Начиная с лета 1969 г. Хэл и его жена Ив жили на чердаке дома Розенблатта, располагавшегося в сельской местности недалеко от города Бруктондейла в штате Нью-Йорк. Ив Седжвик сегодня известна в качестве одного из крупных теоретиков феминизма, а также как литературовед, литературный критик, культуролог, писательница, поэтесса, эксперт в области гендерных и пионер в области квир-исследований [queer studies] (области науки, занимающейся исследованием вопросов, связанных с сексуальной ориентацией и гендерной идентичностью, обычно фокусирующейся на лесбиянках, геях, бисексуалах, трансгендерах, гендерной дисфории, асексуалах, ищущих [questioning], интерсексуальных людях и соответствующих культурах). Розенблатт за символическую сумму сдавал комнаты в своём доме постоянно меняющейся группе, в которую входило от шести до восьми его друзей и учеников, составлявших небольшую квазикоммуну. Обитатели дома по очереди готовили еду для всей группы. После обеда все оставались за обеденным столом, пока Фрэнк читал вслух для развлечения одну или две главы из какой-нибудь книги («Ветер в ивах», «Король былого и грядущего», «Козлик Джайлс» и т. д.). Сообщество в Бруктондейле было формирующей моделью для концепции ненуклеарной небиологической семьи Ив Седжвик, в которой Фрэнк Розенблатт выполнял роль дяди-холостяка [1163, 1164].

Хэл Седжвик вспоминает, что Розенблатт был влюблён в одного из своих студентов, поэтому добавлял его имя в число соавторов некоторых своих статей. Осознавая враждебное отношение общества к гомосексуалам, Розенблатт старался держать личную жизнь в тайне и отговаривал Седжвика от

участия в политическом движении за права геев. По его мнению, общество ещё не было готово принять их такими, какие они есть. Учитывая печальную судьбу Алана Тьюринга, эту позицию вполне можно было понять.

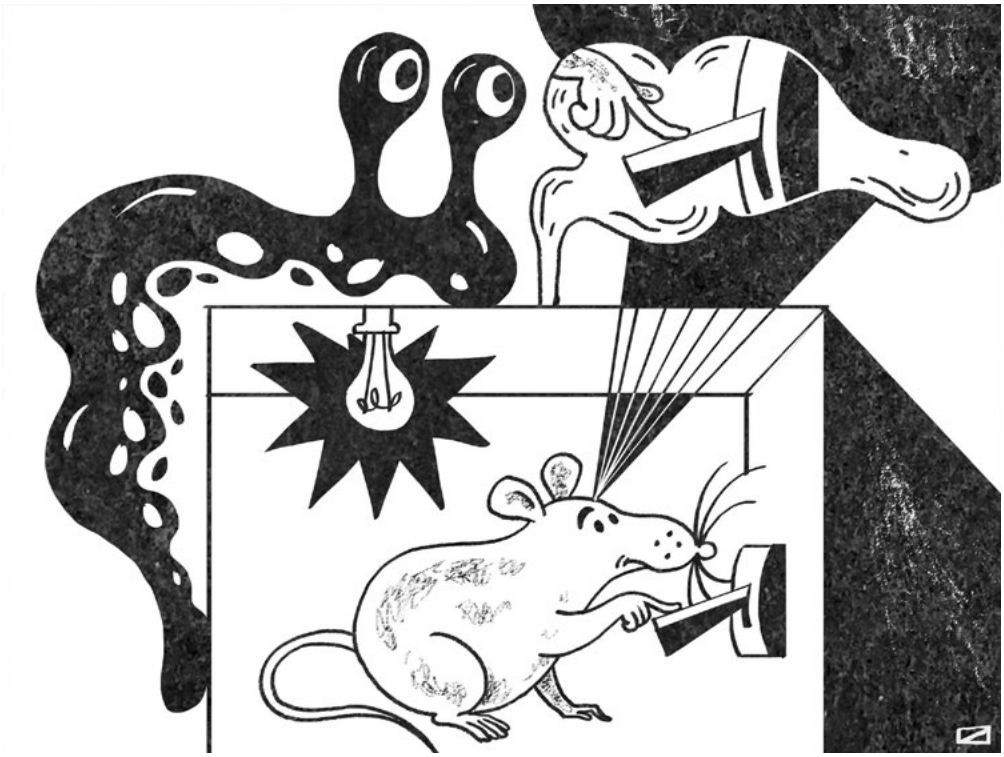
Седжвик так описывает Розенблатта:

Фрэнк был небольшого роста; эксцентричного вида парень, которого, казалось, мало заботит его внешность. Он редко переодевался и обычно был одет в одну и ту же потёртую спортивную куртку или изношенный свитер, всегда носил свои бумаги и книги в одной руке, как студент. Его невыразительное лицо заставляло вас почувствовать, что он точно очень одинокий человек. И хотя Корнеллский университет, несомненно, был его стихией (он находился там почти непрерывно с 1946 года), у меня сложилось впечатление, что за пределами своего кабинета и исследовательских лабораторий он был не совсем уверен в себе.

Каждый день, ближе к вечеру, можно было увидеть «одинокого» Фрэнка, который бродил по Уиллард-Стрейт-Холлу и заходил в Музыкальную комнату в ходе ритуальной прогулки. Тем не менее он никогда не оставался здесь надолго: я видел, как он немного приподнимал голову, его слегка прищуренные глаза смотрели в комнату, чтобы увидеть, нет ли там кого-то, кого он знал. Очки были ему слишком велики и подчёркивали эксцентричный облик. Его глаза редко, казалось, фокусировались на чём-либо или на ком-либо слишком надолго. Если он замечал вас, то его рот расплывался в широкой зубастой улыбке[1165].

Фрэнк был весьма разносторонним человеком: он занимался скульптурой, живописью, горным туризмом, был способен за короткий срок глубоко вникнуть практически в любой предмет, о котором раньше не имел понятия. Он часто записывал новые идеи, пришедшие ему в голову, на салфетках, чековых корешках, на любом подвернувшемся листке бумаги. Был Розенблатт и одарённым музыкантом — он приобрёл домой рояль и часто играл на нём Моцарта, Бетховена и других классиков, но больше всего любил импровизировать на тему известной песенки «Три слепых мышонка». Интересовала Розенблатта и астрономия: он разработал один из первых методов обнаружения экзопланет — транзитный (метод транзитной фотометрии). Фрэнк построил небольшую обсерваторию на холме за домом в Бруктондейле. Когда обсерватория была закончена, Розенблатт стал активным участником проекта SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence, Поиск внеземного разума).

В 1968 г. в ходе праймериз Демократической партии США Розенблатт был активным участником кампании сенатора Юджина Маккарти. Маккарти был активным противником войны во Вьетнаме (Розенблатт также выступал против войны и участвовал в антивоенных акциях), поэтом и лидером леволиберального крыла партии. Особенно большой поддержкой Маккарти пользовался в молодёжной среде. Под влиянием успехов Маккарти в начале избирательной кампании президент Линдон Джонсон решил отказаться от попытки переизбрания.



С 1966 г. Фрэнк присоединился к группе исследования нейробиологии и поведения, созданной на только что учреждённом факультете биологических наук. Его интересовал вопрос о возможности передачи выученных механизмов поведения от одних особей другим. В качестве подопытных животных в экспериментах использовались крысы, которых обучали различным навыкам, например прохождению лабиринта или действиям в ящике Скиннера. Ящик Скиннера был развитием проблемного ящика Торндайка, Скиннер добавил к конструкции Торндайка механизмы для подачи различных стимулов, а также устройство, выдающее награду. По завершении обучения мозг подопытных крыс извлекался и перерабатывался в экстракт, который затем вводился необученным крысам интраперитонеально (внутрибрюшинно), внутривенно или интрацистернально *. Это были не первые опыты Розенблатта с крысами, ещё в 1964 г. он участвовал в исследовании, посвящённом влиянию LSD (диэтиламида d-лизергиновой кислоты) на процессы связывания серотонина в крысином мозге.

Идея с передачей выученного поведения через экстракт мозговых тканей, хотя и может сейчас показаться нелепой, основывалась на вполне рациональной гипотезе. Гипотеза, лежавшая в основе этих экспериментов, заключалась в том, что информация передаётся при помощи молекул РНК

* Интрацистернально здесь — в большую цистерну (лат. *cisterna magna*) подпаутинного пространства головного мозга.

(рибонуклеиновой кислоты), содержащих «адгезивные коды», сигнатуры, заставляющие молекулу связываться с определёнными группами нейронов.

Старт исследованиям группы Розенблатта дали работы других научных коллективов, которыми были продемонстрированы обнадёживающие результаты. В своих экспериментах Эльсе Фьердингстад, Ханс Рёйгард-Петерсен и Томас Ниссен из Института общей зоологии Университета Копенгагена формировали у крыс реакцию на сигнальные огни и затем использовали интрацистернальные инъекции мозгового экстракта[1166]. Джордж Унгар и Карлос Осегера-Наварро использовали в качестве стимула звук удара молотка по металлической тарелке и интраперитонеальное введение экстракта (интересно, что Унгар и Осегера-Наварро пытались в своих экспериментах передавать знания от крыс к мышам)[1167, 1168]. Фрэнк Бабич, Аллан Якобсон, Сьюзен Бубаш и Энн Якобсон из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе также использовали интраперитонеальное введение, но уже без привлечения мышей, только на крысах, а в качестве стимула применяли звук щелчка дозатора для таблеток[1169].

Результаты экспериментов группы Розенблатта были опубликованы в журнале *Nature* в январе 1966 г. Целью экспериментов было воспроизведение результатов предшественников на более внушительной выборке, а также проверка РНК-гипотезы. Всего в экспериментах использовалось 140 самок крыс-альбиносов (60 доноров и 80 реципиентов). Были сформированы контрольные группы, в которых в качестве доноров использовались необученные крысы. Для проверки РНК-гипотезы в двух группах в экстракт была добавлена рибонуклеаза — фермент, катализирующий деградацию РНК. Розенблатт и его коллеги также опробовали различные виды экстракта — приготовленные из целого мозга, из конечного мозга и отдельно из мозжечка крыс. В опытах Розенблатта, как и в работах предшественников, наблюдался эффект передачи выученного поведения (хотя и более слабый), однако РНК-гипотеза была опровергнута. Розенблатт высказал умеренный оптимизм по поводу результатов и предположил, что носителями информации могут быть мелкие молекулы растворимых белков или полипептидов[1170].

Впоследствии исследования в области передачи выученного поведения подверглись широкомасштабной критике, однако и в 1970-е гг. продолжался спор с сообщениями об отдельных положительных результатах в ведущих научных журналах[1171]. Исследователи постепенно утратили интерес к этому направлению, тем более что был достигнут заметный прогресс в понимании молекулярных механизмов работы мозга. Фрэнк Бабич покинул науку, чтобы стать каскадёром, известным нам сегодня по сериалу «Звёздный путь» и другим классическим телесериалам.

Впрочем, отдельные положительные результаты в экспериментах по передаче выученного поведения химическим путём появляются в научной прессе и сегодня. Например, в мае 2018 г. много шума наделали сообщения лаборатории под руководством Дэвида Гланзмана в Институте исследований

мозга Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе. Исследования показали, что РНК из обученной аплизии (морского зайца), введённая в необученную аплизию, может оказывать долгосрочное воздействие на её поведение, напоминающее передачу выученного рефлекса от обученной особи к необученной [1172].

4.4.9

Друзья, увлечения и крысы Розенблатта

4.5 «Чистюли» и «грязнули» — разные школы ИИ

Тут Великий Умывальник,
Знаменитый Мойдодыр,
Умывальников Начальник
И мочалок Командир,
Подбежал ко мне, танцуя,
И, целуя, говорил:
«Вот теперь тебя люблю я,
Вот теперь тебя хвалю я!
Наконец-то ты, грязнуля,
Мойдодыру угодил!»

Корней Чуковский. *Мойдодыр*

В 1950–1960-е гг. в среде американских исследователей в области искусственного интеллекта идейно оформились две школы — «чистюли» [neats] и «грязнули» [scruffies], воплощавшие в своей деятельности два различных подхода в развитии отрасли.

Считается, что первыми о произошедшем идейном расколе открыто заявили Роджер Шанк и Роберт Абельсон, которые рассуждали об отличии их подходов к обработке естественного языка от работ Джона Маккарти, Аллена Ньюэлла, Герберта Саймона и других специалистов, чей подход базировался на более строгих логических концепциях. «Генетически» работы Шанка и Абельсона в Йеле восходили к исследованиям искусственного интеллекта в Массачусетском технологическом институте под руководством Марвина Минского, в ходе которых был создан ряд разговорных систем (о которых мы поговорим подробнее несколько позже). Эти системы производили большое впечатление на современников, хотя и не основывались на проработанных логических концепциях языка.

Названия «чистюли» и «грязнули» вошли в употребление в сообществе специалистов по искусственному интеллекту в начале 1980-х гг., вскоре после того, как Абельсон рассказал о фундаментальных противоречиях в своём выступлении на ежегодном собрании Общества когнитивных наук в 1981 г. Вот несколько избранных цитат из этого выступления (они должны звучать в вашей голове низким голосом, поскольку Абельсон был басом в Русском хоре Йельского университета).

Разум должен отражать всё, что есть в реальном мире, и ему нужно вмешиваться в этот мир для достижения определённых целей. Но мир запутан, а цели многообразны. Следовательно, по мере того как модели разума всё больше приближаются к реальности, они могут становиться пространными и неподъёмными. Если упор делается на науку больше, чем на познание, то каноны точных наук диктуют стратегию изоляции идеализированных подсистем, которые можно моделировать при помощи элегантных продуктивных формализмов. Ясность и точность ценятся высоко, даже в ущерб реализму здравого смысла. В карикатурном виде эта тенденция выражается девизом бескомпромиссного приверженца строгой науки Джона Тьюки, гласящим: «Лучше быть неправым полностью, чем правым приблизительно».

Одна тенденция указывает внутрь разума, чтобы увидеть, что может быть в нём. Другая указывает наружу, на некоторую формальную систему, которой можно манипулировать при помощи логики. Каждый из лагерей отказывает другому в законных правах на когнитивную науку. Одна сторона говорит: «То, что вы делаете, может показаться наукой, но это не имеет ничего общего с познанием». Другая сторона говорит: «То, что вы делаете, может показаться познанием, но это не имеет ничего общего с наукой».

Стороннему наблюдателю может показаться, что проблема возникает главным образом из-за двуглавого термина «когнитивная наука». Я хорошо помню обсуждение возможных названий, и, хотя мне никогда не нравилась

«когнитивная наука», альтернативы были ещё хуже — мерзости вроде «эпистологии» или «репрезентономии».

Абельсон считал, что в основе разногласий внутри когнитивной науки лежат фундаментальные идеологические противоречия, которые пронизывают практически все сферы жизни общества, начиная от науки и заканчивая искусством, религией и воспитанием детей. Цитируя своего неназванного коллегу (вполне вероятно, что Шанка), Абельсон говорит, что большая часть столкновений между людьми в их делах происходит именно между «чистюлями», которые понимают и оценивают человеческое поведение, используя в качестве эталона систему непреложных норм и правил, и «грязнулями», для которых источником ценности являются люди, реакция которых и определяет важность тех или иных вещей[1173].

«„Чистюли“, — говорил Шанк, *— носят хорошо выглаженную одежду и работают над поверхностными феноменами, такими как логика и синтаксис, которые они могут понять и поместить в уютные маленькие коробочки. „Грязнули“ одеваются небрежно и любят иметь дело с такими беспорядочными проблемами, как семантика**»[1174].

Абельсон считал, что «чистюли» выбирают осторожный, экспериментальный и медленный (с точки зрения «грязнуль») путь к получению скромных результатов в надежде, что они в итоге составят целостную общую картину. «Грязнули» практикуют более интуитивный, целостный и хаотичный (с точки зрения «чистюль») подход, применяя методы моделирования и наблюдения, чтобы получить общую картину, надеясь, что она подскажет, на каких мелких деталях следует сосредоточиться. В то время как «чистюли» посвящают своё время изучению работы отдельных компонентов познания, «грязнули» надеются раскрыть динамическую взаимосвязь между этими компонентами. «Чистюли» полагают, что понимание каждого из компонентов даст нам понимание того, как эти компоненты вписываются в работающую когнитивную систему. «Грязнули» считают, что ни один из компонентов наших когнитивных систем не является изолированным и, поскольку каждый из них сильно зависит от работы других, именно их взаимодействие является ключом к пониманию познания. «Чистюли» искали «чистые» и последовательные решения задач представления знаний, в то время как «грязнули», как правило, использовали всевозможные «хаки», проверяя различные решения, чтобы увидеть на практике, что будет работать, а что нет[1175]. Вообще, «хак», «хакинг» (взлом) задачи — типичные инструменты из арсенала «грязнуль».

В общем и целом, доводя до крайности, позицию «чистюль» можно выразить фразой *«[Если факты противоречат теории, то] тем хуже для фактов!»* (её Дьёрдь Лукач приписывал[1176] Фихте, а другие авторы — Гегелю). Крайним

* Семантика — раздел лингвистики, изучающий смысловое значение единиц языка. Иногда термин также употребляется в качестве синонима понятия «смысл».

же выражением взглядов «грязнуль» является старинная русская пословица: «Всё полезно, что в рот полезло».

Географически центром школы «чистюль» были Стэнфордский университет, Институт Карнеги — Меллона, Эдинбургский университет, университеты Западного побережья США, а также японские университеты. «Грязнули» работали в Массачусетском технологическом институте, Йеле и в университетах Восточного побережья США[1177].

Типичными представителями школы «чистюль» были Аллан Ньюэлл, Герберт Саймон, Джон Андерсон, Кит Холиоук и Пол Тагард, «грязнуль» — Абельсон и Шанк, Сеймур Пейперт, Терри Виноград и Дон Норман.

В 1995 г. книга Холиоука и Тагарда «Умственные прыжки: аналогия в творческом мышлении» (Mental Leaps, Analogy in Creative Thought)[1178] подвела итоги двух десятилетий усилий «чистюль» в изучении мышления, построенного на аналогиях, в то время как книга Шанка и Клири «Машины для обучения» (Engines for Education)[1179], вышедшая годом раньше, стала изложением результатов двух десятилетий исследований «грязнуль» в лабораториях Шанка (в Йельском, а затем в Северо-Западном университете), посвящённых изучению накопленного опыта. Ни одна из этих работ не ссылается на другую, и ни одна из них не даёт чёткого представления о мировоззрении породивших их школ[1180].

Традиционно к числу «грязнуль» относят и Марвина Минского, иногда даже называя его основателем этой школы. Однако к началу 1990-х гг. он занимал уже скорее центристскую позицию. В 1991 г. Минский опубликовал статью под названием «Логическое против аналогического, или Символьное против коннекционистского, или „Чистюля“ против „грязнули“» (Logical Versus Analogical or Symbolic Versus Connectionist or Neat Versus Scruffy), в которой доказывал необходимость синтеза этих двух подходов.

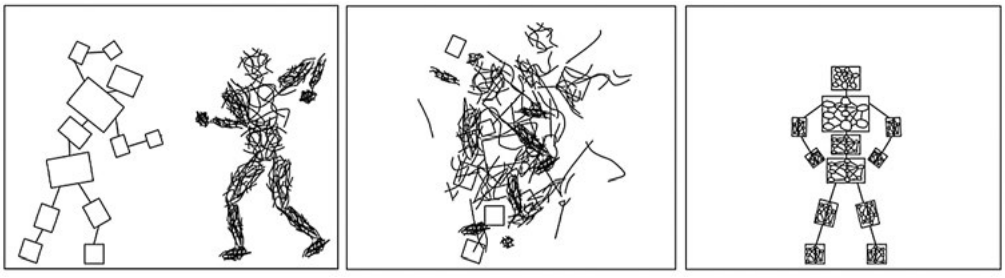


Рис. 99. «Конфликт между теоретическими крайностями» (рисунок из вышеупомянутой статьи Марвина Минского)

Конечно, подход имени мира, дружбы и жвачки имеет большое число поклонников и в наши дни, тем более что множество современных интеллектуальных систем вполне успешно сочетают в себе методы, предложенные как

в работах «чистюль», так и в трудах «грязнуль». Многие «грязные» методы подверглись «очистке» по мере того, как были созданы теоретические обоснования их применения. Например, развитие высокоразвитых формализмов, таких как байесовские сети и математическая оптимизация в 1990-е гг., привело некоторых исследователей ИИ, таких, например, как Стюарт Рассел и Питер Норвиг, к выводу о победе «чистюль». Памела Маккордак, симпатизировавшая «грязнулям», в 2004 г. отмечала: *«В те дни, когда я пишу эти строки, в ИИ установилась гегемония „чистюль“ — людей, которые считают, что по крайней мере машинный интеллект предпочтительно описывать при помощи логических, даже скорее математических терминов».* С другой стороны, за несколько прошедших десятилетий было изобретено множество «грязных» трюков и хаков, в первую очередь под влиянием выхода интеллектуальных систем за границы университетских лабораторий — производственная необходимость нередко порождает «грязные» решения, откладывая более изящные решения на будущее. Недаром различие между «чистюлями» и «грязнулями» нередко представляют в виде противопоставления декларативного и процедурного подходов: там, где «чистюли» оперируют формальными определениями, «грязнули» сконцентрированы на создании действующих агентов. Это противоречие было прекрасно выражено Марксом за сотню лет до Абельсона и Шанка: *«Философы лишь различным образом объясняли мир; но дело заключается в том, чтобы изменить его»* [Die Philosophen haben die Welt nur verschieden interpretiert, es kommt aber darauf an, sie zu verändern][1181].

В разгар дебатов, пришедшийся на первую половину 1980-х гг., Нильс Нильссон (знакомый нам по нейросетевым исследованиям в SRI), к тому времени президент Ассоциации по развитию искусственного интеллекта, заявил, что области нужны оба подхода. Он писал: *«Большая часть знаний, которые мы хотели бы иметь внутри наших программ, может и должна быть представлена декларативно, в некоем декларативном, подобном логике формализме. Структуры для особых случаев [ad hoc] также имеют право на существование, но большинство из них порождается самой предметной областью»*[1182]. Алекс Пентланд и Мартин Фишлер из MIT в ответ заявили: *«Нет сомнений в том, что дедукция и логические формализмы будут играть важную роль в исследованиях ИИ, однако, похоже, что они не соответствуют той королевской роли, которую Нильс им отводит. Этот претендент на королевский престол хотя и не голый, но, похоже, имеет весьма ограниченный гардероб»*[1183].

Спор этот далёк от завершения и в наши дни (хотя сами термины «чистюли» и «грязнули» вышли из моды) и обостряется по мере успехов, достигнутых исследователями, тяготеющими к одному или другому направлению.

4.6 Марвин Минский и зима искусственного интеллекта

Мир опустел… Земля остыла…
А вьюга трупы замела,
И ветром звёзды загасила,
И бьёт во тьме в колокола.

И на пустынном, на великом
Погосте жизни мировой
Кружится Смерть в веселье диком
И развевает саван свой!

Иван Бунин. *Ночная вьюга*

Одним из интригующих моментов истории искусственного интеллекта является вопрос о том, почему после успехов Розенблатта и Уидроу, после всей волны энтузиазма, порождённой работами Мак-Каллока и Питтса, научное сообщество на долгие годы утратило интерес к коннекционистским моделям. Нередко забвение нейросетевых моделей на многие годы и смену фокуса исследований связывают с критикой работ Розенблатта Марвином Минским и Сеймуром Пейпертом. Действительно, если попытаться объяснить одним предложением, то проще всего произвести на свет примерно такой текст: в 1969 г. увидела свет книга Минского и Пейперта «Перцептроны» (Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry), в которой были показаны функциональные ограничения подобных моделей (в частности, доказано, что перцептрон не может выучить операцию «исключающее или»), в результате произошло смещение научного интереса и финансирования на другое направление исследований в области ИИ — символьный подход (собирательное название для всех методов искусственного интеллекта, основанных на высокоуровневом «символьном» (человекочитаемом) представлении задач и логики их решения). Выглядит на первый взгляд логично и регулярно воспроизводится в научно-популярной литературе в различных вариациях со степенью категоричности, зависящей только от упоротости авторов. Действительность, впрочем, по всей видимости, куда сложнее, а во многом и вовсе противоречит этой лубочной картинке. Давайте попробуем разобраться в произошедшем по порядку.

Для этого мы вернёмся в 1963 г., когда 35-летний Сеймур Пейперт после четырёх лет работы в Университете Женевы перебрался в Массачусетский технологический институт, чтобы занять должность научного сотрудника (а с 1967 г. — профессора прикладной математики). Позже в своих воспоминаниях Пейперт писал: *«Многие факторы сделали этот шаг привлекательным. Эта была перспектива получить доступ к компьютерам и работать с Марвином Минским и Уорреном Мак-Каллоком, а также удивительное чувство шаловливости [playfulness], которое я испытывал там во время своих кратких визитов. Когда я наконец приехал, всё это воплощалось в ночных сессиях у компьютера PDP-1, который был выделен Минскому. Это было чистой воды игрой. Мы выясняли, что можно сделать с помощью компьютера, и что-нибудь интересное оказывалось стоящим. Никто ещё не знал достаточно для того, чтобы указывать, что какие-то из вещей были серьёзнее других. Мы были как младенцы, открывающие мир»* [1184].

Первыми сотрудниками Минского стали студенты из клуба технического моделирования железной дороги, которые занимались созданием собственных релейных компьютеров, предназначенных для управления моделями поездов. Находившаяся в конце 1950-х гг. в распоряжении Минского ЭВМ (одна из нескольких в мире) была настоящей приманкой для увлечённых студентов, которые нередко пробирались в вычислительный центр, чтобы часами работать над собственными программами. Минский не стал наказывать студентов за незаконные проникновения в лабораторию и нецелевое использование университетской собственности, вместо этого он нанял их на работу. Позже он так отзывался о своих новых сотрудниках: *«Они были странными. У них было что-то вроде ежегодного соревнования: кто быстрее других проедет по всем станциям Нью-Йоркского метро. Это занимало около 36 часов и требовало детальной проработки поездки, планирования, изучения расписания движения поездов. Эти ребята были сумасшедшими».* Но именно такой род «сумасшествия» оказался полезным с точки зрения информатики. Особое внимание к деталям и неутолимое желание что-то создавать пришлись весьма кстати с точки зрения написания программ и проектирования аппаратуры. Лаборатория Минского процветала, и он не испытывал никаких проблем с поиском сотрудников. *«Кто-нибудь писал сообщение или письмо: мне интересно то-то и то-то. На что я отвечал, что можно заглянуть и посмотреть, понравится ли работа у меня,* — вспоминал он. — *Человек приезжал на неделю или две, получал достаточно денег и уезжал, если ему не нравилось. Это действительно было весьма экстравагантно, но команда лаборатории была сообществом самозаряжающимся. У них был свой язык. Они могли сделать за три дня то, на что обычно уходит месяц. И если у нас в команде появлялся кто-то талантливый и харизматичный, мы принимали его с радостью».*

Энтузиазм Минского щедро подпитывался ресурсами. Он вспоминал: *«Я не писал ни единой заявки до 1980 года. Я просто всегда появлялся там, где был кто-нибудь вроде Джерри Визнера из Массачусетского технологического*

4.6

Марвин Минский и зима искусственного интеллекта

института. Мы с Джоном Маккарти начали работать над ИИ где-то в 1958 или 1959 г., как раз когда пришли в MIT. У нас была пара студентов-помощников. Однажды к нам заглянул Джерри Визнер и спросил, как идут дела. Мы сказали, что всё идёт неплохо, но было бы здорово, если у нас ещё было бы три-четыре аспиранта в помощь. Он сказал, мол, хорошо, зайдите к Генри Циммерману и скажите, пускай выделит вам лабораторию. Спустя два дня у нас была небольшая лаборатория на три-четыре комнаты и огромная куча денег, которую MIT получил от IBM за исследования в области вычислительной техники. Никто не знал, что делать с деньгами, поэтому их отдали нам»[1185].

Пейперт сразу же включился в работу команды Минского, которая на тот момент носила название «Группа по искусственному интеллекту» (Artificial Intelligence Group)[1186]. Причина, по которой маститый учёный и один из лидеров большого научного направления, коим в те годы был Минский, пригласил к себе в команду Пейперта (в одном из источников говорится «юного Пейперта», хотя разница в возрасте «мэтра» и «юноши» составляла меньше года), была довольно забавной. Вот как описывает её сам Пейперт: *«В 1960 г. на Лондонском симпозиуме по теории информации, организованном Колином Черри, произошло событие, которое изменило мою карьеру… Я пришёл на это собрание как математик, интересующийся вычислительными идеями и теорией информации. Я пришёл туда с работой, содержавшей небольшую теорему. И то, что случилось, было наихудшим кошмаром для того, кто пришёл на собрание с теоремой. Выступавший передо мной докладчик продемонстрировал точно такую же теорему и доказал её столь же убедительно, как и я, правда несколько иным способом, но вы не можете рассчитывать на признание, имея в руках всего лишь немного другое доказательство. Однако то, что поначалу казалось кошмаром, превратилось на деле в отличный подарок. Человеком, опередившим меня, был Марвин Минский. Мы с Марвином пришли на эту встречу, по существу, с одной и той же работой, и это привело нас к сотрудничеству, которое продолжалось в течение многих лет…»*[1187]

В редких случаях сотрудничество между двумя исследователями бывает столь продуктивным: лейбл «Минский и Пейперт» пришёл на смену лейблу «Минский и Маккарти». Вскоре усилиями нового дуэта были начаты новые исследовательские программы в области теории вычислений, робототехники, человеческого восприятия и детской психологии. Когда в 1968 г. Группа по искусственному интеллекту официально стала Лабораторией искусственного интеллекта MIT, Минский и Пейперт стали её содиректорами[1188].

В итоге группа коллег Минского превратилась в лидеров в академических кругах, в индустрии и даже в Голливуде. Когда фантаст Артур Кларк работал совместно со Стенли Кубриком над фильмом «2001 год: Космическая одиссея», он обратился к своему другу Минскому за помощью, чтобы тот помог создать образ системы искусственного интеллекта на космическом корабле. Вместе они создали HAL 9000, компьютер, который по сей день является олицетворением страхов перед злонамеренным искусственным разумом. Многие запомнили мигающий красный «глаз» HAL, похожий на индикатор машины ENIAC[1189].

Вообще, культурное влияние пионеров ИИ трудно переоценить. Хотя их фамилии мало что скажут современному обывателю, они порой стояли у истоков идей, общеизвестных в наши дни. Так, например, беседа Уоррена Мак-Каллока и режиссёра Романа Кройтора, использованная Артуром Липсеттом при создании короткометражного фильма «21–87», стала для Джорджа Лукаса источником концепции «силы» в киноэпопее «Звёздные войны». В целом короткометражка «21–87» оказала большое влияние на многие работы Лукаса[1190, 1191].

Первые успехи искусственного интеллекта в 1960-е гг. неизбежно привлекли к себе внимание общественности и, помимо восторгов, столь же неизбежно вызвали зависть, неприязнь и страхи со стороны отдельных людей. В 1965 г. философ Хьюберт Дрейфус опубликовал отчёт для корпорации RAND под названием «Алхимия и искусственный интеллект» (позже расширенный до книги «Чего не умеют компьютеры» (What Computers Still Can't Do: A Critique of Artificial Reason, 1992)). В нём Дрейфус выступил с решительной критикой оптимистичных заявлений специалистов в области искусственного интеллекта, таких как Аллен Ньюэлл, Клифф Шоу, Герберт Саймон и прочие, презрительно назвав их «искусственной интеллигенцией» [artificial intelligentsia]. Говоря о нереалистичности оптимистичных заявлений энтузиастов искусственного интеллекта (например, заявления Саймона и Ньюэлла в 1957 г. о том, что в течение ближайших десяти лет цифровой компьютер сможет стать чемпионом мира по шахматам), Дрейфус утверждал, что во многих направлениях ИИ наблюдается резкое замедление, и предполагал, что это является свидетельством приближения к фундаментальным ограничениям[1192]. Иногда ему даже приписывают утверждение о том, что ни одна шахматная программа никогда не обыграет даже десятилетнего ребёнка. Впрочем, сам Дрейфус позднее отрицал, что когда-либо делал подобное заявление[1193].

Ньюэлл и Саймон также предсказывали в 1957 г., что в течение десяти лет цифровой компьютер сможет открыть и доказать важную новую математическую теорему. Их оптимизм был основан на первых успехах в этом направлении, достигнутых ещё в 1956 г., когда программа «Логический теоретик» (Logical Theorist) смогла доказать 38 из 52 теорем, приведённых в «Принципах математики» Рассела и Уайтхеда, а для теоремы о равнобедренном треугольнике (что углы, противолежащие боковым сторонам равнобедренного треугольника, равны), известной также под названием pons asinorum («мост осла»), обнаружила более короткое и изящное доказательство, чем приведённое в книге Рассела. Однако *Journal of Symbolic Logic* (Журнал символьной логики) отказался публиковать статью, в качестве одного из авторов которой была указана компьютерная программа. Позже, впрочем, выяснилось, что найденное «Логическим теоретиком» доказательство было известно Паппу Александрийскому ещё в IV в. н. э.[1194, 1195, 1196]

В момент, когда представители того или иного направления, окрылённые первыми успехами, заняты расширением и развитием пионерских работ,

они оказываются чрезвычайно уязвимы для критики, выдержанной в стиле «это невозможно в принципе!». Любой несбывшийся в срок оптимистичный прогноз будет использован противниками как доказательство своей правоты. Именно поэтому критически важным навыком эксперта в области прорывных инноваций является умение отличить это самое «невозможно в принципе» от «пока не достигнуто». Первые поезда создавались для перевозки грузов и развивали скорость, уступающую скорости пешехода. Когда на смену зубчатым рельсам, предназначенным для увеличения тяги паровоза, пришли гладкие, скорость составов выросла, что неизбежно вызвало к жизни идею пассажирских составов. Газеты немедленно начали писать о том, что в результате запуска таких поездов куры перестанут нестись, коровы — давать молоко, а сами пассажиры сойдут с ума от сумасшедшей скорости в… 30 км/ч![1197] В декабре 1902 г. американский юмористический журнал *Puck* писал: *«В настоящее время всё происходит так быстро, что люди, говорящие: „Это сделать невозможно“, каждый раз прерываются теми, кто это делает»*[1198]. Судя по всему, именно из этой фразы родилась пословица, приписываемая ныне безответственными журналистами и ушлыми бизнес-тренерами то Конфуцию, то китайской народной мудрости: *«Человек, который говорит, что что-то невозможно сделать, не должен мешать делать это другим»*[1199]. Несмотря на неясный источник этой мудрости, трудно не согласиться с её автором.

Дрейфус, фиксируя чрезмерный оптимизм энтузиастов первой весны искусственного интеллекта, не утруждал себя доказательствами принципиальной невозможности воплощения в жизнь их надежд, неспециалисту же было трудно понять, действительно ли те или иные обещания учёных, работавших над созданием систем искусственного интеллекта, были подобны обещаниям создать вечный двигатель или же, напротив, заявления их критиков были подобны суждению о том, что поездка со скоростью 30 км/ч неизбежно окончится в сумасшедшем доме. Однако самая неприятная для прогресса особенность этой проблемы заключается в том, что заявить о невозможности чего-либо многократно проще, чем на деле продемонстрировать несостоятельность такого заявления.

Пейперт выступил в роли одного из адвокатов Ньюэлла, Шоу и Саймона, подготовив для RAND собственный отчёт, посвящённый разбору критики Дрейфуса. Не ограничившись одной лишь письменной критикой, Пейперт организовал матч, в котором Дрейфус должен был сразиться с шахматной программой MacHack VI, созданной другом-хакером Пейперта из MIT Ричардом Гринблаттом совместно с двумя студентами — Дональдом Истлейком и Стивеном Крокером[1200]. В партии против программы Гринблатта философ потерпел сокрушительное поражение. Саймон так прокомментировал игру: *«Он [Дрейфус] писал <…> что шахматная программа будет играть <…> в механические, нечеловеческие шахматы… Но это была замечательная игра <…> — захватывающая схватка двух дровосеков* (*to hack*, напомним, означает «врубаться». *— С. М.*) *со всплесками прозрений и дьявольских планов <…> великими моментами драмы и катастрофы, которые происходят в подобных играх»*[1201].

В 1976 г. с помощью компьютера была доказана знаменитая теорема о четырёх красках, и хотя это не было ещё полностью автоматизированным доказательством, однако стало важным математическим результатом[1202]. В наши дни автоматизированное доказательство теорем стало привычным, как и доминирование компьютеров в шахматах. Большая часть прогнозов, раскритикованных Дрейфусом, сбылась, хотя и не в пределах тех оптимистичных сроков, на которые рассчитывали пионеры искусственного интеллекта. При этом открытым остаётся вопрос о том, насколько деятельность Дрейфуса и других критиков ИИ повлияла на прогресс в этой области. Могли бы надежды и чаяния Ньюэлла, Саймона и других энтузиастов отрасли воплотиться в жизнь раньше, если бы не активная проповедь недостижимости их целей?

Жизнь, безусловно, куда сложнее плохой драмы про борьбу бобра с ослом, однако чтение некоторых работ по истории искусственного интеллекта оставляет во рту неповторимое послевкусие мыльного сериала. Если в истории с Дрейфусом и успехами учёных из MIT мы видим «солярных» Пейперта и Минского, то в многочисленных рассказах об утрате на многие годы интереса к нейронным сетям и коннекционистским моделям вообще мы встречаем уже «лунарных» Минского и Пейперта, которым вменяется разгром целого научного направления на границе 1960-х и 1970-х гг. и чуть ли не смерть

отчаявшегося и потерявшего всё Фрэнка Розенблатта. Спустя полвека не так уж просто разобраться, действительно ли учёные из MIT развалили ту самую часовню, на развалинах которой сегодня расцвёл буйным цветом город-сад глубокого обучения. В самом ли деле SNARC оказался Буджумом * или в древних книгах возникла какая-то путаница?

Прохладная история о первой зиме искусственного интеллекта начинается вполне в духе лучших болливудских блокбастеров. Дело в том, что Фрэнк Розенблатт и Марвин Минский были одноклассниками в Высшей научной школе Бронкса [1203] (впрочем, они хотя бы не были братом и сестрой, разлучёнными в детстве). Минский, как и Розенблатт, интересовался нейронными сетями — вспомним его опыты с «крысами», учившимися искать выход из лабиринта при помощи хеббовского обучения. Именно нейросетевым моделям была посвящена диссертация Минского, однако позже Минский разочаровался в них, сконцентрировавшись на символьных моделях. Именно поэтому громкое обсуждение работ Розенблатта в прессе вызвало в лагере Минского и Пейперта плохо скрываемый скептицизм. Дэвид Вальц, бывший в те годы аспирантом в MIT, вспоминал позже: *«Марвин и Сеймур действительно интересовались перцептронами. Я с группой других студентов посещал их семинар, целью которого было узнать как можно больше о перцептронах. Мы должны были просто методично изучить, на что они были способны, а на что не способны, и попытаться охарактеризовать их каким-то образом»* [1204].

В 1969 г. по итогам работы над семинаром и в ходе него Минский и Пейперт опубликовали книгу «Перцептроны» (Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry), которая среди прочего указывала на ряд ограничений, свойственных подобным моделям.

Вот как описывает один из современных авторов дальнейшие события:

Последствия выхода книги были немедленными и драматичными. Розенблатт и его сотрудники оказались совершенно не способны опровергнуть выдвинутые аргументы. Исследования нейронных сетей были потоплены [dead in the water] из-за обвинений в преднамеренном саботаже ради того, чтобы перенаправить федеральное финансирование от сетей на программы, основанные на символьных манипуляциях. Ни один уважающий себя исследователь не осмеливался коснуться исследований нейронных сетей в течение десятилетия, пока коннекционистское движение восьмидесятых не продемонстрировало больший потенциал в получении плодотворных результатов. Коннекционистские исследователи в области ИИ до сих пор обвиняют Минского и Пейперта за десятилетие забвения!

В издании «Перцептронов» 1972 года присутствует рукописное посвящение памяти Фрэнка Розенблатта, погибшего в результате несчастного случая

* «Охота на Снарка» (The Hunting of the Snark) — поэма Льюиса Кэрролла, написанная в 1876 г., образец литературы нонсенса. Основа сюжета: команда из девяти человек и бобра охотится за таинственным Снарком. Буджум (Boojum) — особо опасная разновидность Снарка, встреча с которым может привести к исчезновению охотника.

на лодке, человека, по всей видимости окончательно разбитого в результате «дела Перцептрона»[1205].

4.6 Марвин Минский и зима искусственного интеллекта

Честно говоря, мой личный драмометр сломался ещё на неловком каламбуре про потопленные коннекционистские исследования.

Вот что писал Пейперт спустя почти два десятилетия после вышеописанных событий: *«Пытались ли мы с Минским убить коннекционизм и как мы относимся к его воскрешению? Здесь требуется нечто более сложное, чем оправдания. Да, был некоторый налёт враждебности, стоящий за исследованиями, о которых сообщалось в „Перцептронах“, и было некоторое раздражение тем, как развивается новое движение; частично наша мотивация была связана, как мы прямо признали в нашей книге, с тем фактом, что финансирование и силы исследователей растрачиваются, как мне представляется и сейчас (поскольку история о новых мощных нейросетевых механизмах серьёзно преувеличена), на вводящие в заблуждение попытки использовать коннекционистские методы в практических приложениях. Но большая часть мотивации для написания „Перцептронов“ возникла из более фундаментальных проблем, многие из которых явно затрагивают разделение между сетевиками и программистами»*[1206].

Важно понимать, что ограничения, о которых писали в своей книге Минский и Пейперт, относятся к отдельным архитектурам нейронных сетей в применении к некоторым классам задач. Многих заявлений, приписываемых Минскому и Пейперту, они попросту никогда не делали. Например, Минский и Пейперт никогда не утверждали, что нейронные сети неспособны выполнять операцию XOR (исключающее или). Хотя единичный искусственный нейрон может вычислять только небольшое число логических предикатов, было общеизвестно, что сети, составленные из таких элементов, могут вычислять любую возможную логическую функцию. Об этом писали ещё Мак-Каллок и Питтс, которые даже показали, что при помощи предложенных ими нейронов можно создать машину Тьюринга. Это упоминается как в «Принципах нейродинамики» Розенблатта, так и в «Перцептронах».

Некоторые авторы идут ещё дальше, утверждая, например, что *«Минский и Паперт доказали, что простые пресептоны* (sic!) *могут решать только очень узкий класс линейно сепарабельных задач»*[1207]. К сожалению, в данном случае мы имеем дело с глубоко укоренившимися заблуждениями[1208].

В действительности Минский и Пейперт показывают, что перцептроны с единственным ассоциативным слоем не могут вычислять некоторые предикаты, если по крайней мере один из нейронов в ассоциативном слое не связан ненулевым весом с каждым из входов[1209]. Это противоречило надежде некоторых исследователей на сети с несколькими слоями «локальных» нейронов, каждый из которых будет соединён лишь с небольшим количеством входов. Такие сети в вычислительном плане гораздо более выгодны, чем громоздкие полносвязные сети.

На обложке ранних изданий книги Минского и Пейперта изображены туго закрученные спирали. Помимо деморализации противника (у меня нет другого объяснения фиолетовым линиям на красном фоне и красным на зелёном), эти изображения иллюстрируют две проблемы, на которых сконцентрирован анализ авторов. Одна из спиралей представляет собой единичный замкнутый контур, а вторая — два несвязанных замкнутых контура. Предикаты, вычисление которых затруднительно для сравнительно простых перцептронов, — это связность [connectedness], а также чётность, под которой понимается способность перцептрона отличить картинку с нечётным количеством фигур от картинки с их чётным числом (операция XOR является частным случаем этой проблемы). В общем-то, проблема определения чётности или нечётности минимально различимых перцептроном объектов является наихудшим случаем.

Генри Блок, математик из Корнеллского университета, работавший с Розенблаттом над перцептронами, детально разобрал критику Минского и Пейперта, уделив среди прочего внимание зацикленности последних на вопросах чётности и связности: *«Другим свидетельством этой разницы во взглядах [между Розенблаттом и Минским/Пейпертом] является озабоченность Минского и Пейперта такими предикатами, как чётность и связность. Человек не может воспринимать ни чётность больших множеств (количество точек на газетной фотографии чётное или нечётное!), ни связность (на обложке книги Минского и Пейперта [„Перцептроны“] есть два объекта: один является связным, другой нет. При помощи визуального осмотра практически невозможно определить, что есть что). Розенблатт был бы рад приблизиться к человеческим возможностям и, скорее, негативно отнёсся бы к машине, которая вышла бы за их пределы, поскольку он стремился моделировать именно человеческое восприятие»*[1210].

Минский и Пейперт сосредоточили своё внимание на проблемах, которые считали удобными для подтверждения собственной позиции. Своим ответом Блок показал, что эти же проблемы могут интерпретироваться иначе и что в иной интерпретации их существование может даже служить доводом в пользу перспективности нейросетевого подхода. Для Минского и Пейперта это были очень тревожные, аномальные проблемы. Исследователи нейронных сетей знали о трудностях, с которыми элементарные перцептроны сталкивались в некоторых задачах задолго до того, как Минский и Пейперт начали развивать свою критику в середине 1960-х гг.[1211] Например, среди тринадцати требующих решения проблем перцептронов, перечисленных в «Принципах нейродинамики», Розенблатт упоминает необходимость изучения возможных механизмов разделения фигур (фигура-фон) и исследования формирования абстрактных понятий и распознавания топологических или метрических отношений[1212]. Однако для коннекционистов наличие этих проблем не было сильным аргументом против нейросетевого подхода. По их мнению, элементарные перцептроны были только первой стадией исследования нейронных сетей. Розенблатт открыто признавал ограничения

элементарных перцептронов, но относился к ним совершенно иначе, чем его критики. Для сторонников символьного подхода такие проблемы, как связность и чётность, были решающими аргументами против расширения исследований перцептронов вообще. Но для Розенблатта, Блока, Уидроу и прочих ограничения элементарных перцептронов были указанием на необходимость создания и исследования более сложных перцептронов. Коннекционисты подчёркивали положительные свойства элементарного перцептрона (его сходимость, подобие естественным нейронным сетям, его распределённую память, устойчивость к повреждениям, параллелизм и т. д.) и заявляли, что необходимы дальнейшие исследования более продвинутых моделей для того, чтобы получить возможность решать задачи более сложные, чем те, решения которых могут быть найдены элементарным перцептроном[1213].

Блок писал: *«…Простой перцептрон (который состоит из набора входов, одного слоя нейронов и одного выхода без обратной связи или перекрёстной связи) совсем не то, что энтузиаст перцептронов мог бы считать типичным перцептроном. Его больше интересуют перцептроны с несколькими слоями, обратной связью и перекрёстными связями… сначала был изучен простой перцептрон, и для него была доказана „теорема сходимости перцептрона“. Это было обнадёживающим результатом не потому, что простой перцептрон сам по себе является адекватной моделью мозга (что, разумеется, не так; ни один из существующих перцептронов не может даже начать соревноваться с мышью!), а поскольку он продемонстрировал, что адаптивные нейронные сети в их простейших формах в принципе могут обучаться. Это говорит о том, что более сложные сети могут демонстрировать более интересное поведение. Минский и Пейперт иначе смотрят на роль простого перцептрона… Таким образом, то, что перцептронисты брали как временную опору, Минский и Пейперт интерпретируют как конечную структуру»*[1214].

По вопросу о более сложных перцептронах, чем элементарный, Минский и Пейперт в своей книге 1969 г. ограничились лишь несколькими комментариями. Они сформулировали (ныне печально известное) пессимистическое «интуитивное суждение» о невозможности разработки эффективных методов обучения многослойных сетей: *«Перцептрон уже показал, что его стоит изучать, несмотря на серьёзные ограничения (и даже благодаря им!). Он обладает многими свойствами, достойными внимания: линейность; интригующая теорема об обучении [о сходимости перцептрона]; очевидная простота как образца устройства для параллельных вычислений. Нет оснований предполагать, что любое из этих достоинств распространяется на его многослойный вариант. Тем не менее мы считаем, что важной исследовательской задачей является выяснение (или опровержение) нашего интуитивного суждения о том, что обсуждаемое расширение бесплодно. Разве только будет открыта какая-нибудь мощная теорема о сходимости или будет найдена некоторая глубокая причина, в силу которой для многослойной машины невозможно найти „теорему об обучении“, представляющую какой-либо интерес»*[1215].

На мой взгляд, наиболее интересным вопросом является вопрос о том, действительно ли книга Минского и Пейперта оказала столь глобальное влияние на направление исследований по крайней мере на целое десятилетие. Вот что сообщает по этому поводу Бернард Уидроу:

Когда вышла книга Минского и Пейперта под названием «Перцептроны», я каким-то образом получил её экземпляр. Издатели присылают мне миллионы книг, так что эта однажды оказалась у меня в офисе. Я посмотрел на эту книгу и увидел, что они проделали серьёзную работу, и в этой книге была хорошая математика, но я сказал: «Боже мой, какой пасквиль». Я был так рад, что они назвали эту вещь перцептроном, а не адалайном, потому что на самом деле они в основном говорили об адалайне, а не о перцептроне. Я чувствовал, что они достаточно узко определили, что такое перцептрон, что они смогли доказать, что он практически ничего не мог сделать. Задолго до этой книги я уже успешно адаптировал MADALINE, который представлял собой целый набор нейронных элементов. Всё это беспокойство и муки по поводу ограничений линейной разделимости, которая является главной темой данной книги, давно преодолены.

Мы уже перестали работать над нейронными сетями. Насколько я знал, никто не работал над нейронными сетями, когда вышла эта книга. Я не мог понять, в чём смысл этого, какого чёрта они это сделали. Но я знаю, сколько нужно времени, чтобы написать книгу. Я подумал, что они, должно быть, решили написать эту книгу очень давно, чтобы нанести удар по данной области, сделать всё возможное, чтобы понатыкать булавок в воздушный шар. Но к тому времени, когда книга вышла, эта область уже ушла. Никто не занимался этим.

Я думаю, что эта книга приобрела значение со вторым пришествием нейронных сетей, когда они вернулись. Тогда люди начали оглядываться на эту книгу, и некоторые из них, слабые духом, были обескуражены. Это не значит, что книга неинтересна и не ценна. Напротив. Но у них было всего несколько маленьких примеров со множеством нейронов [нейронных сетей, состоящих из более чем одного нейрона]. Я думаю, что большая часть сказанного в книге относится к единичному нейрону. Я обнаружил, что, конечно же, один нейрон не может делать всё, но то, что он может сделать, это чертовски интересно. Один нейрон не может выучить всё, ну и что с того?[1216]

Если пытаться найти человека, который в действительности заметно повлиял на выделение ресурсов для коннекционистских проектов Розенблатта, то им был вовсе не Минский и тем более не Пейперт, а скорее Майкл Мэнсфилд, сенатор-демократ от штата Монтана и лидер сенатского большинства (1957–1961), с подачи которого была принята так называемая поправка Мэнсфилда 1969 г. (Public Law 91–121). Эта бюджетная поправка запретила финансирование за счёт военного бюджета исследований, в которых отсутствует прямая или явная связь с конкретной военной функцией.

4.6

Марвин Минский и зима искусственного интеллекта

С конца 1950-х до середины 1960-х гг. финансирование науки в США пережило период беспрецедентного роста. Его начало восходит к периоду после Второй мировой войны, но пик темпов роста приходится на конец 1950-х — начало 1960-х гг. Именно на этот период пришлась поддержка проектов Розенблатта со стороны Управления военно-морских исследований (Office of Naval Research, ONR). В то время ONR активно финансировало проекты, не связанные с прикладными областями, а поддержка науки возросла до беспрецедентного уровня. Причиной этой небывалой щедрости стал запуск Советским Союзом первого искусственного спутника Земли. Непосредственной реакцией на запуск спутника стал Закон о реорганизации обороны 1958 г., в соответствии с которым было создано Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (Advanced Research Projects Agency, ARPA). Сегодня эта организация известна под названием DARPA.

Позже многие учёные с ностальгией оглядывались назад, на послевоенный период, когда, основываясь на опыте Манхэттенского проекта, такие учреждения, как Управление военно-морских исследований, предоставляли щедрое финансирование университетам без каких-либо условий. Однако золотой век в исследовательской сфере продлился недолго. Растущая озабоченность оборонных ведомств краткосрочными эффектами финансируемых ими исследований была отражена в поправке Мэнсфилда. Именно она подтолкнула Министерство обороны к поддержке более краткосрочных прикладных исследований. В том числе поправка коснулась финансирования проектов Розенблатта со стороны ONR, ведь в их отношении учёный никогда не заявлял о возможности получения быстрой практической отдачи. Хотя Розенблатта нередко обвиняют в том, что он делал слишком громкие и преувеличенные заявления о возможностях перцептронов, но в действительности эта гипотеза не слишком подкреплена фактами.

Прекращение потока финансирования от военных не означало полной остановки работ Розенблатта, он продолжал работать над перцептронами и дальше[1217].

В целом в конце 1960-х гг. ландшафт коннекционистского ИИ выглядел следующим образом. Уидроу, так и не найдя эффективного алгоритма обучения многослойных сетей, переключился на телефонное оборудование на основе ADALINE. Группа исследователей из SRI переключилась на робототехнический проект, не предполагавший на тот момент использования нейросетевых моделей. Розенблатт занимался фоноперцептроном «Тобермори», а также увлекательными опытами над крысами до своей трагической смерти.

По воспоминаниям Ричарда О'Брайена, главы Отделения биологических наук Корнеллского университета во времена Розенблатта, Фрэнк мечтал, чтобы «Тобермори» смог увидеть мышь, бегущую по комнате, и сказать (вслух): *«Я вижу белый объект с длинным хвостом, издающий писк, и, должно быть, это мышь»*. Таким образом, «Тобермори» сможет видеть, слышать и говорить, а также правильно сочетать все эти три элемента[1218].

По случаю смерти Розенблатта О'Брайен в 1971 г. в своей траурной речи в Конгрессе сказал: *«...Всего несколько лет назад он [Розенблатт] получал сотни тысяч долларов в год на исследовательские гранты от агентств, которые считали, что его работа стоит того, но он стал жертвой поправки Мэнсфилда, и последние несколько лет эти деньги таяли, как летний снег. В последние несколько месяцев у него оставалось совсем немного».*

А затем в малочисленном коннекционистском мирке на десятилетие воцарилась тишина, хотя даже это не совсем соответствует действительности, о чём мы поговорим несколько позже.

Завершая главу, мне хочется сказать несколько слов об обстоятельствах гибели Фрэнка Розенблатта, в отношении которых до сих пор существует ряд открытых вопросов. Большая часть современных источников воспроизводит скупую формулу некролога: погиб в результате несчастного случая на водах [boating accident], произошедшего в Чесапикском заливе в день его рождения, 11 июля 1971 г.[1219] При этом, по одной из версий, он утонул, катаясь на лодке вместе с двумя студентами[1220], по другой — в море была найдена его пустая лодка, но тело Розенблатта найдено не было[1221]. На основе последней версии некоторые авторы выдвигают предположение о самоубийстве Розенблатта, якобы вызванном крушением его надежд и критикой со стороны Минского и Пейперта[1222]. Его бывший аспирант Хэл Седжвик, однако, пишет по этому поводу следующее: *«Хорошо зная Фрэнка, я с трудом верю в эту теорию»*[1223].

Ив Кософски Седжвик отозвалась на смерть Розенблатта стихотворением «Смерть от воды»:

A Death by Water

There was a real death on a real summer night.
I rocked and rocked, to offer the death, room and time,
but it had taken its own time and contracted its own room
and was really gone.
I was so adequate on that chair,
so naked, compact, inexorable, and rich.
I worked. I was all there.
Not dead in struggle like a fish.
It will not be borne — I want to say — we are lost.
I want to rock this death out, but it's already
out: it is bearable. But at the usual cost.
This world has rocked me badly[1224].

Eve Kosofsky Sedgwick

Смерть от воды

Настоящей летней ночью произошла настоящая смерть.
Я долго тряслась, в попытках найти для смерти место и время,
но она сама выбрала время, и договорилась о месте,
и свершилась взаправду.
Я была так уместна на том стуле,
такая нагая, компактная, неумолимая и богатая.
Я работала. Я вся была там.
Не погибшая в борьбе, подобно рыбе.
Этого не вынести — я хочу сказать — мы пропали.
Я хочу стрясти эту смерть, но она уже
вышла: и это можно вынести. Но по обычной цене.
Этот мир сильно потряс меня.

Ив Кософски Седжвик, пер. С. Маркова

Указатель

А

абак *45–51, 53, 54, 69*
Абельсон, Роберт (Robert Paul Abelson, 1928–2005) *472, 474–476*
Абрамсон, Норман (Norman Manuel Abramson, 1932–2020) *456*
авари, игра (awari) *242, 255*
Автомат, Шахматный Игрок, механическое устройство *261, 262, 264*
агентно-ориентированный подход *17*
Адамар, Жак (Jacques Salomon Hadamard, 1865–1963) *276*
Адамс
– Дуглас (Douglas Noël Adams, 1952–2001) *307*
– Майкл (Michael Adams, род. в 1971) *334*
Адельсон-Вельский, Георгий Максимович (1922–2014) *285, 288*
Адер, Клеман (Clément Ader, 1841–1925) *356*
Айер, Альфред (Alfred Jules "Freddie" Ayer, 1910–1989) *22*
Айяла, Фелипе де (Felipe Guamán Poma de Ayala, 1551–1615) *48, 49*
Акоста, Хосе де (José de Acosta, 1539–1600) *49*
аксон *363, 364, 372, 379, 381, 384, 390–392, 395, 398, 403, 436, 438*
активное обучение *31*
Александр, Аарон (Aaron (Albert) Alexandre, 1766–1850) *262*
Аливизатос, Пол (Armand Paul Alivisatos, род. в 1959) *400, 401*
Алиханов (Алиханян), Абрам Исаакович (1904–1970) *284*
Алкмеон Кротонский (Ἀλκμαίων, V в. до н.э.) *358*
Алленовский институт головного мозга в Сиэтле *403*
Аллис, Виктор (Louis Victor Allis, род. в 1965) *339*
Альбурт, Лев Осипович (род. в 1945) *315*
Альгайер, Иоганн (Johann Baptist Allgaier, 1763–1823) *262*
Альенде, Сальвадор (Salvador Guillermo Allende Gossens, 1908–1973) *447*
алькерк, игра (alquerque) *229*
Альтхофер, Инго (Ingo Althöfer, род. в 1961) *271, 329*
альфа-бета-отсечение *237, 238, 244, 277–279, 289, 296*
альфа-волна, альфа-ритм *371, 389*
амакриновый *398, 399*
Аналитическая машина (Analytical Engine) *102*
Ананд, Вишванатан (Viswanathan "Vishy" Anand, விசுவநாதன் ஆனந்த், род. в 1969) *314, 316, 322, 324, 333, 334*
Анантараман, Томас (Thomas Satyaprakash Anantharaman, род. в 1959) *307, 310, 311*
Андерсон, Гарольд (Harold W. Anderson) *162*
Андерсон, Джон (John Robert Anderson, род. в 1947) *475*
ансамбль *342, 438, 450*
Антикитерский механизм *55, 61*
Антонов, Майкл (Michael Antonoff) *315*
Аньези, Мария Гаэтана (Maria Gaetana Agnesi, 1718–1799) *79*
Аполлоний Пергский (Ἀπολλώνιος ὁ Περγαῖος, 262 до н.э. — 190 до н.э.) *58*
Арбакл, Тимоти (Timothy Arbuckle) *277*
аримаа, игра (arimaa) *349*
Аристотель (Ἀριστοτέλης, 384 до н.э. — 322 до н.э.) *54, 358*
Аристофан (Ἀριστοφάνης, 444 до н.э. — между 387 и 380 до н.э.) *53*
Арлазаров, Владимир Львович (род. в 1939) *217, 285, 288, 290*
Арнольд, Владимир Игоревич (1937–2010) *465, 466*
Архимед (Ἀρχιμήδης, 287–212 до н.э.) *60, 67*
архитектура фон Неймана, фон-неймановские машины *209, 422, 455*
асимметричная игра *190*
астролябия *45, 57–60, 68*
Атанасов
– Джон (John Vincent Atanasoff, 1903–1995) *159–164*
– Иван (1876–1956) *159*
Аткин, Ларри (Lawrence Ronald "Larry" Atkin, род. в 1946) *289*
Аттли, Альберт (Albert Maurel Uttley, 1906–1985) *450*
Афинский университет (Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών) *56*
ачи, игра (achi) *201*

Б

Бабич, Фрэнк (Frank R. Babich, род. в 1933) *470*
Бабкин, Борис Петрович (1877–1950) *440*

баг-чал, игра («тигры и козы») *228*
Бал, Генри (Henri Elle Bal, род. в 1958) *255*
Бан, Амир (Amir Ban, род. в 1956) *334*
Бард, Александр (Alexander Bengt Magnus Bard, род. в 1961) *109*
Барри, Генри (Henry Deacon Barry, 1849–1908) *128*
Баттенберг, Людвиг фон (Ludwig Alexander von Battenberg, позднее принял имя Louis Alexander Mountbatten, 1854–1921) *130*
Батуринский, Виктор Давыдович (1914–2002) *327*
Бауден, Бертрам (Bertram Vivian Bowden, Baron Bowden, 1910–1989) *267*
Бейтсон, Грегори (Gregory Bateson, 1904–1980) *421*
Бек, Адольф (Adolf Beck, 1863–1942) *362, 367, 369*
Белл, Роберт (Robert Charles Bell, 1917–2002) *200*
Беллман, Ричард (Richard Ernest Bellman, 1920–1984) *212*
Бельски, Мартин (Martin A. Belsky) *277*
Бенджамин, Джоэль (Joel Lawrence Benjamin, род. в 1964) *317, 319, 320, 326, 332*
Бёнш, Уве (Uwe Bönsch, род. в 1958) *311*
Беньюс, Жанин (Janine M. Benyus, род. в 1958) *356*
Берг, Аксель Иванович (1893–1979) *301*
Бергер, Ханс (Hans Berger, 1873–1941) *367–372, 389, 448*
Бергстрём, Йохан Вильгельм (Johan Wilhelm Bergström, 1812–1881) *90*
Бересфорд, Чарльз (Charles William de la Poer Beresford, 1846–1919) *128*
Бёрл, Реймонд (Raymond Louis Beurle, 1921–2013) *450*
Берлекэмп, Элвин (Elwyn Berlekamp, 1940–2019) *279*
Берлинер, Ханс (Hans Berliner, 1929–2017) *218, 304–307, 350*
Берлинский университет (Humboldt University of Berlin) *210, 368*
Берн, Эрик (Eric Berne, наст. имя Eric Lennard Bernstein, 1910–1970) *189*
Бернстайн, Алекс (Alex Bernstein, Алексей Владимирович Бернштейн, 1930–1999) *272, 274–279*
Бернштейн, Владимир Максимилианович (1900–1936) *276*
Берри, Клиффорд (Clifford Edward Berry, 1918–1963) *159, 162–164*
Бессонов, Николай Иванович (1906–1963) *284*
Бетховен, Людвиг ван (Ludwig van Beethoven, 1770–1827) *468*
Бигелоу, Джулиан (Julian Bigelow, 1913–2003) *421, 442, 446, 447*
Билас, Фрэн (Frances V. “Fran” Bilas, 1922–2012) *165*
Биллингс, Джон (John Shaw Billings, 1838–1913) *111, 114*
Бинсвангер, Отто Людвиг (Otto Ludwig Binswanger, 1852–1929) *369*
бионика *355–357, 359*
биполярные клетки *398*
Бир, Стаффорд (Anthony Stafford Beer, 1926–2002) *447*
Бирман, Алан (Alan Wales Biermann, род. в 1939) *240, 241*
Бируни, Абу Рейхан Мухаммед ибн, аль (ابوریحان بیرونی, 973–1048) *68*
Бисгайер, Артур (Arthur Bisguier, 1929–2017) *275, 277*
Битман, Александр Рафаилович (1939–2013) *288*
Битсакис, Янис (Γιάννης Μπιτσάκης) *65*
Битти, Дэвид (David Richard Beatty, 1871–1936) *132, 133*
Бишофф, Клаус (Klaus Bischoff, род. в 1961) *311*
Блант, Энн Изабелла (Anne Isabella Noel Blunt, 1837–1917) *102*
Блейк, Уильям (William Blake, 1757–1827) *403*
Блок, Генри (Henry David Block, 1920–1978) *486, 487*
Блох, Ричард (Richard Milton Bloch, 1921–2000) *147*
Богарне, Евгений (Eugène Rose de Beauharnais, 1781–1824) *262*
Богомолец, Александр Александрович (1881–1946) *181*
Бонапарт, Наполеон (фр. Napoléon Bonaparte, корс. Napulione Buonaparte, 1769–1821) *96, 262*
Бонд, Джордж (George Meade Bond, 1852–1935) *117*
Боненбергер, Иоганн фон (Johann Gottlieb Friedrich von Bohnenberger, 1765–1831) *75*
Бор, Нильс (Niels Henrik David Bohr, 1885–1962) *223*
Борель, Эмиль (Émile Borel, 1871–1956) *235, 379*
бот *349*
Ботвинник, Михаил Моисеевич (1911–1995) *283, 293, 295–298, 300–302, 337, 339*
Боудич, Генри (Henry Pickering Bowditch, 1840–1911) *381*
Брайант, Мартин (Martin Bryant, род. в 1958) *246, 247, 252, 253*
Брайс, Джеймс (James Wares Bryce, 1880–1949) *145*
Браун
– Артур (Arthur Brown) *300*
– Теодор (Theodore Henry Brown, 1888–1973) *145*
– Уолтер (Walter Shawn Browne, 1949–2015) *218, 351*
Брейн, Альфред (Alfred E. “Ted” Brain, 1923–2004) *461*

Бреннер, Сидни (Sydney Brenner, 1927–2019) *401*
бридж, игра *190, 218, 242, 349*
Бринк, Андерс Магнус (Anders Magnus Brinck, 1794–1861) *90*
Бромли, Алан (Allan George Bromley, 1947–2002) *63–65, 91*
Бронштейн, Давид Ионович (1924–2006) *286, 287*
Брудно, Александр Львович (1918–2009) *215, 237, 287*
Брук, Исаак Семёнович (1902–1974) *179, 183, 285*
Брукс, Родни (Rodney Brooks, род. в 1954) *18*
Брусенцов, Николай Петрович (1925–2014) *184*
Брюнель, Изамбард Кингдом (Isambard Kingdom Brunel, 1806–1859) *104*
Бубаш, Сьюзен (Suzanne Bubash) *470*
Будапештский университет *210*
Буль, Джордж (George Boole, 1815–1864) *142*
Бурский, Филипп (Philip Bursky) *237*
Бус, Гари (Gary J. Boos, род. в 1944) *259*
Бутенко, Владимир Иванович (1939–2018) *300*
Бутон, Чарльз (Charles Leonard Bouton, 1869–1922) *193*
Бушински, Шай (Shay Bushinsky) *334*
Бушон, Базиль (Basile Bouchon) *93–95*
Бьёрнссон, Ингви (Yngvi Björnsson, род. в 1964) *259*
Бьюзен, Тони (Tony Buzan, 1942–2019) *253*
Бэббидж
– (Тип), Элизабет (Elizabeth Plumleigh Babbage (Teape), 1757–1844) *78*
– Бенджамин (Benjamin Babbage, 1753–1827) *78*
– Генри (Henry Prevost Babbage, 1824–1918) *90, 106*
– Мэри Энн (Mary Anne Babbage, 1798–1878) *78*
– Чарльз (Charles Babbage, 1791–1871) *78–80, 83–87, 89–93, 98–102, 104–107, 110, 138, 142, 146, 172, 201, 202, 230, 235, 266, 269*
Бэкус, Джон (John Warner Backus, 1924–2007) *455*
БЭСМ, быстродействующая электронная счётная машина *182, 274, 287*
Бюффон, Жорж-Луи Леклерк де (Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon, 1707–1788) *47*

В

Вагнер, Роберт (Robert Alan Wagner, 1941–2018) *279*
Вагнёр, Кристиан (Christian Jacques Raymond Wagneur, 1934–2015) *200*
Вайберг, Мартин (Martin Wiberg, 1826–1905) *91, 146*
Вальво, Майкл (Michael Valvo, 1942–2004) *308, 317, 324, 329*
Вальдейер, Генрих Вильгельм (Heinrich Wilhelm Gottfried Waldeyer, 1836–1921) *363*
Вальц, Дэвид (David Leigh Waltz, 1943–2012) *484*
вари (оваре), игра (wari, oware) *228*
Васубандху (वसुबन्धु) *51*
Васумитра (वसुमित्र, I–II вв.) *51*
Введенский, Николай Евгеньевич (1852–1922) *366*
Вебер, Брюс (Bruce Weber, род. в 1953) *330*
Вейс, Жорж (Jules Adolphe Georges Weiss, 1851–1931) *372, 374–378*
Векслер, Норман (Norman Wexler) *253*
Веллингтон, Артур Уэлсли (Arthur Wellesley, 1st Duke of Wellington, 1769–1852) *87*
Венский университет (Universität Wien) *362*
Вернадский, Владимир Иванович (1863–1945) *409*
Вернам, Гилберт (Gilbert Sandford Vernam, 1890–1960) *170, 171*
Веррал, Артур (Arthur Woollgar Verrall, 1851–1912) *383*
Вигнер, Юджин (Eugene Paul "E. P." Wigner, Wigner Jenő Pál, 1902–1995) *210*
Вида, Марко Джироламо (Marco Girolamo Vida или Marcus Hieronymus Vida, 1485?–1566) *289*
Визель, Торстен (Torsten Nils Wiesel, род. в 1924) *466*
Визнер, Джерри (Jerome "Jerry" Bert Wiesner, 1915–1994) *426, 428, 429, 446, 478, 479*
Вилла, Луиджи (Luigi Villa, род. в 1945) *305, 306*
Вильгельм, Адольф (Adolf Wilhelm, 1864–1950) *57*
Виндиш, Карл Готлиб фон (Karl Gottlieb von Windisch, 1725–1793) *261*
Винер
– Маргарет (Margaret Wiener (Engemann), 1894–1989) *417, 427, 428, 430*
– Норберт (Norbert Wiener, 1894–1964) *223, 235, 264, 265, 416–421, 423, 424, 427–430, 435, 442, 443, 447*
Виноград, Терри (Terry Allen Winograd, род. в 1946) *475*
Винчи, Леонардо да (Leonardo di ser Piero da Vinci, 1452–1519) *356*
Вирасена (वीरसेन, 792–853) *70*
Висконсинский университет в Мадисоне (University of Wisconsin–Madison) *160*
витализм *26*

Витсен, Николаас (Nicolaes Witsen, 1641–1717) *51*
Владимиров, Евгений Юрьевич (род. в 1957) *327*
ВНИИЭ (Всесоюзный научно-исследовательский институт электроэнергетики) *301*
Вокансон, Жак (Jacques de Vaucanson, 1709–1782) *93, 95, 96, 113, 264*
Вольта, Алессандро (Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta, 1748–1827) *374*
Вольфф, Патрик (Patrick Wolff, род. в 1968) *313*
Вордсворт, Уильям (William Wordsworth, 1770–1850) *201*
Воробьёв, Николай Николаевич (1925–1995) *207*
воровство стратегии *227*
Врангель, Пётр Николаевич (1878–1928) *410*
Всесоюзный электротехнический институт (ныне — Всероссийский электротехнический институт) *181*
Вудхауз, Роберт (Robert Woodhouse, 1773–1827) *79*
вызванный потенциал *361*
выравнивание (alignment) *402*
Высшая научная школа Бронкса (The Bronx High School of Science) *275*
Высшая техническая школа инженеров дорог, каналов и портов (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, ETSICCP) *265*

Г

Габор, Денеш (Dennis Gabor, Gábor Dénes, 1900–1979) *211*
Гавайский университет (University of Hawai'i System) *456*
Гальвани, Луиджи (Luigi Galvani, 1737–1798) *360, 373*
Гальтон, Фрэнсис (Francis Galton, 1822–1911) *35*
ганглионарные клетки *398, 399*
Ганш, Михаэль Готтлиб (Michael Gottlieb Hansch, 1683–1749) *74*
Гарвардский университет (Harvard University) *106, 146, 193, 312, 383, 403, 418, 424*
Гарнер, Алан (Alan Garner, род. в 1934) *177*
Гаррисон, Джон (John Harrison, 1693–1776) *84*
Гассер, Герберт Спенсер (Herbert Spencer Gasser, 1888–1963) *379, 384, 388*
Гаутама, Акшапада (अक्षपाद गौतम, VI в. до н.э.) *358*
Гегель, Георг Вильгельм Фридрих (Georg Wilhelm Friedrich Hegel, 1770–1831) *474*
Гёдель
– Курт (Kurt Friedrich Gödel, 1906–1978) *150–154, 157*
– Рудольф (Rudolf II Gödel, 1902–1992) *153*
Гейл, Дэвид (David Gale, 1921–2008) *225*
гекс, игра *222–226*
Гексли, Томас (Thomas Henry Huxley, 1825–1895) *391*
Гемин Родосский (Γεμῖνος ὁ Ῥόδιος) *62*
генератор псевдослучайных чисел *171*
Герлах, Йозеф (Joseph von Gerlach, 1820–1896) *363*
Геродот (Ἡρόδοτος Ἁλικαρνᾱσσεύς, ок. 484 до н.э. — ок. 425 до н.э.) *53*
Герон Александрийский (Ἥρων ὁ Ἀλεξανδρεύς, прибл. 10 — прибл. 75) *60, 67, 93*
Герофил (Ἡρόφιλος, ок. 335 до н.э. — ок. 280 до н.э.) *358*
Герстнер, Лу (Louis "Lou" Vincent Gerstner Jr., род. в 1942) *312, 330*
Гершель
– Джон (John Frederick William Herschel, 1792–1871) *79, 83, 84, 86*
– Уильям (Friedrich Wilhelm Herschel, 1738–1822) *79*
Гётлин, Густав (Gustaf Fredrik Göthlin, 1874–1949) *384*
гидравлический интегратор *161*
Гильберт, Давид (David Hilbert, 1862–1943) *142, 157, 465*
гиперполяризация *392*
Гиппарх (Ἵππαρχος, ок. 190 до н.э. — ок. 120 до н.э.) *58, 68*
Гиппократ (Ἱπποκράτης, ок. 460 до н.э. — ок. 370 до н.э.) *358*
Гис, Вильгельм (Wilhelm His, 1831–1904) *363*
Гитлер, Адольф (Adolf Hitler, 1889–1945) *170, 175, 304, 417*
Гитциг, Эдуард (Julius Eduard Hitzig, 1838–1907) *365*
главный участок боя (ГУБ) *297*
Гланзман, Дэвид (David L. Glanzman) *470*
Гленни, Алик (Alick Edwards Glennie, 1925–2003) *267, 268*
глиальные клетки *390*
глубокое обучение (deep learning) *353*
Глушков, Виктор Михайлович (1923–1982) *280, 282, 285*
го-моку, игра *242*
го, игра *4, 18, 156, 227, 228, 345–350, 352*
Гоббс, Томас (Thomas Hobbes, 1588–1679) *264, 358*
Голдстайн, Герман (Herman Heine Goldstine, 1913–2004) *422*
Гольджи, Камилло (Camillo Golgi, 1843–1926) *363–365*
гомеоскоп *114, 115*
гомеостаз, гомеостазис *442*
Гомеостат (Homeostat) *442–448*
Горлен, Кейт (Keith Gorlen) *289*
Горслей (Хорсли), Виктор (Victor Alexander Haden Horsley, 1857–1916) *370*

Готч, Фрэнсис (Francis Gotch, 1853–1913) *370*
Гоуэр, Альберт (Albert Gower, род. в 1935) *303*
градиент *393, 413*
Гранжан, Уильям (William Burke Grandjean) *241*
Грант, Джордж Барнард (George Barnard Grant, 1849–1917) *91, 146*
Грейг
– Воронцов (Woronzow Greig, 1805–1865) *103*
– Самуил Самуилович (1778–1807) *103*
Гретц, Герберт (Herbert R. Grätz) *296*
Гринблатт, Ричард (Richard D. Greenblatt, род. в 1944) *482*
Гринспен, Ральф (Ralph J. Greenspan, род. в 1950) *401*
Гровс, Лесли (Leslie Richard Groves, 1896–1970) *196*
Группа по искусственному интеллекту (Artificial Intelligence Group) *479*
Грэм-Камминг, Джон (John Graham-Cumming) *106*
Грюнберг, Ханс-Ульрих (Hans-Ulrich Grünberg, род. в 1956) *311*
Грюнхаген, Альфред (Alfred Grünhagen, 1842–1912) *382*
Губруд, Марк (Mark Avrum Gubrud) *20*
Гувер, Джон Эдгар (John Edgar Hoover, 1895–1972) *197*
Гуд, Ай Джей (Irving John (“I. J.”, “Jack”) Good, 1916–2009) *345*
Гуденаф, Уильям (William Goodenough, 1867–1945) *125*
Гудини, Гарри (Harry Houdini, при рождении Weisz Erik, 1874–1926) *263*
Гунсберг, Исидор (Isidor Gunsberg, 1854–1930) *263*
Гуревич, Илья Маркович (род. в 1972) *313*
Гутенмахер, Лев Израилевич (1908–1981) *184*
Гюмпель, Чарльз (Charles Godfrey Gümpel, 1835–1921) *263*

Д

Д’Арсонваль, Жак Арсен (Jacques Arsène d’Arsonval, 1851–1940) *366*
Давид II (David II, Dàibhidh II, 1324–1371) *154*
дальномер *126, 127, 129, 130*
Данилевский, Василий Яковлевич (1852–1939) *366*
Данн, Натан (Nathan Dunn, 1782–1844) *262*
Дарвин, Чарльз (Charles Galton Darwin, 1887–1962) *438*
ДеБласи, Джо (Joseph S. DeBlasi, 1935–2022) *317*
девять дырок, игра (nine holes) *201*
Дезарг, Жерар (Girard Desargues, 1591–1661) *75*
Дей, Лоуренс (Lawrence Day, род. в 1949) *218*
ДеКарло, Чарльз (Charles DeCarlo, 1921–2004) *277*
Декарт, Рене (René Descartes, 1596–1650) *264*
декодер *38*
Демосфен (Δημοσθένης, 384 до н.э. — 322 до н.э.) *54*
дендрит *363, 364, 372, 395, 398, 403, 436*
Денк, Винфрид (Winfried Denk, род. в 1957) *401*
Денкер, Арнольд (Arnold Sheldon Denker, 1914–2005) *306, 308*
деполяризация *392*
Дерр, Уиллард (Willard Allan Derr, 1911–1983) *195*
детерминированная игра *206*
Джадд, Хэл (Hal Judd) *277*
Джарецки, Кэрол (Carol Jarecki, 1935–2021) *324*
Джеллико
– Джон (John Rushworth Jellicoe, 1st Earl Jellicoe, 1859–1935) *128, 133*
– Николас (Nicholas Charles Joseph John Jellicoe, род. в 1953) *133*
Дженнингс, Бетти (Betty Jean Jennings, 1924–2011) *165*
Дженсен, Эрик (Eric C. Jensen, род. в 1956) *240, 241*
Джефсон, Томас (Thomas Jephson, 1784–1864) *80*
Джинджихашвили, Роман Яковлевич (род. в 1944) *335*
Джонс
– Александр (Alexander Raymond Jones) *61, 68*
– Уильям (William Jones, 1746–1794) *289*
Джонсон, Линдон (Lyndon Baines Johnson, 1908–1973) *468*
Дидро, Дени (Denis Diderot, 1713–1784) *22*
Дикон, Альфред (Alfred Deacon, 1808–1886 или 1831–1906) *91*
Диксон, Джон (John K. Dixon) *237*
Дикхут, Франц-Йозеф (Franz-Josef Dickhut, род. в 1969) *347*
Дилан, Роберт (Robert Dylan, наст. имя Robert Allen Zimmerman, род. в 1941) *286*
Диоген Лаэртский (Διογένης ὁ Λαέρτιος, II–III вв.) *54*
Директорат морских боеприпасов и торпед (Directorate of Naval Ordnance and Torpedoes, DNO) *128, 131*
Доджен, Гил (Gil Dodgen, 1950–2016) *247, 248, 250*
домино, игра *242*
Донкин, Брайан (Bryan Donkin, 1768–1855) *91*
Донской, Михаил Владимирович (1948–2009) *288, 290–292, 298*
Дрейер
– Дезмонд (Desmond Parry Dreyer, 1910–2003) *133*
– Луи Эмиль (John Louis Emil Dreyer, 1852–1926) *129*
– Фредерик (Frederic Charles Dreyer, 1878–1956) *129, 131–133, 135*

Дрейфус, Хьюберт (Hubert Lederer Dreyfus, 1929–2017) *480, 482*
Дуглас, Александр (Alexander Shafto “Sandy” Douglas CBE, 1921–2010) *203*
Дуда, Ричард (Richard O. Duda, род. в 1936) *463*
Дэви, Хамфри (Humphry Davy, 1778–1829) *85*
Дэвис, Хэллоуэлл (Hallowell Davis, 1896–1992) *379*
Дюбуа-Реймон, Эмиль (Emil Heinrich du Bois-Reymond, 1818–1896) *360, 373, 374*
Дюмареск, Джон (John Saumarez Dumaresq, 1873–1922) *127, 128*
Дюран, Эдвард (Edward Dana Durand, 1871–1960) *121*

Е

Евграфов, Марат Андреевич (1926–1997) *282*
Евдокс Книдский (Εὔδοξος ὁ Κνίδιος, ок. 408 до н.э. — ок. 355 до н.э.) *58*
Ершов, Андрей Петрович (1931–1988) *286, 287*
Есенин-Вольпин, Александр Сергеевич (1924–2016) *288*

Ж

Жаккар, Жозеф Мари (Joseph Marie Jacquard, 1752–1834) *93, 96–99, 102, 146*
Жданов, Пётр Сергеевич (1903–1949) *181*
жертвенная комбинация Грекo *302*
Животовский, Александр *285*
Жолио-Кюри
– Ирен (Irène Joliot-Curie, 1897–1956) *379*
– Фредерик (Jean Frédéric Joliot-Curie, 1900–1958) *379*

З

задача
– [восстановления] регрессии *37*
– генерации (порождения) данных *37*
– классификации *33*
– преобразования последовательностей *37*
– сокращения размерности *37*
Заде, Лотфи (Lotfi Askar Zadeh, 1921–2017) *298*
Задыхайло, Игорь Борисович (1931–1998) *282*
закрашивающие сети (Flood-Filling Networks, FFNs) *402, 403*
Заславски, Клавдия (Claudia Zaslavsky, 1917–2006) *198*
Захаров, Виктор Борисович (род. в 1961) *220*
Зобрист, Альберт (Albert Lindsey Zobrist, род. в 1942) *346*
Золотарёв, Иван Васильевич (1855–?) *410*
Золотарёва, Эмилия Ивановна (Emily (Emilia) Rashevsky (Zolotareff), 1899–2002) *410*
зубрёжка (rote learning) *238*
Зыгальский, Генрих (Henryk Zygalski, 1908–1978) *168*

И

ибн Шакир, братья Ахмад, Мухаммад и аль-Хасан ибн Муса (جعفر محمد بن موسى بن شاكر, أبو, до 803–873, بن موسى بن شاكر, الحسن, أحمد بن موسى بن شاكر, 803–873, 810–873) *67, 93*
Иванов, Александр Владимирович (род. в 1956) *312*
Ивахненко, Алексей Григорьевич (1913–2007) *285*
Ивс, Говард (Howard Whitley Eves, 1911–2004) *417, 418*
игра
– в имитацию *22*
– с неполной информацией *191*
– с непостоянной суммой *191*
– с несовершенной информацией *192*
– с нулевой суммой *191*
– с полной информацией *191*
– с постоянной суммой *191*
– с совершенной информацией *192*
Идальго, Давид Эспарца (David Esparza Hidalgo, род. в 1925) *48*
идеоскоп *115*
Ижикевич, Евгений Михайлович (род. в 1967) *395*
Иконом, Антониос (Αντωνίου Οικονόμου, 1850–1902) *56*
Иллинойсский университет в Чикаго (University of Illinois at Chicago) *407*
Ильескас, Мигель (Miguel Illescas Córdoba, род. в 1965) *313, 332*
Императорский Новороссийский университет в Одессе (ныне — Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова) *121*
Императорский университет Святого Владимира в Киеве (ныне — Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко) *410*
Иноуэ, Хироси (Hiroshi Inoue) *350*
Институт
– исследований мозга в Берлине (Kaiser-Wilhelm-Institut für Hirnforschung, ныне — Max-Planck-Institut für Hirnforschung) *372*
– исследований мозга Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе (UCLA Brain Research Institute, University of California, Los Angeles) *471*

– исследования колебаний Берлинского технического университета (Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung, ныне — Фраунгоферовский институт телекоммуникаций) *141*
– Карнеги — Меллона (Carnegie Mellon University) *475*
– кибернетики АН УССР (ныне — Институт кибернетики имени В. М. Глушкова НАН Украины) *280*
– математики АН УССР (ныне — Институт математики НАН Украины) *280*
– медицинских исследований Общества Макса Планка (Max Planck Institute for Medical Research) *396, 401*
– общей зоологии Университета Копенгагена (Institute of General Zoology, University of Copenhagen) *470*
– перспективных исследований (Institute for Advanced Study, IAS) *62, 152, 153, 210*
– прикладной математики АН СССР (ИПМ) *279*
– проблем управления АН СССР (ныне — Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН) *216, 288*
– систем управления Академии наук Грузинской ССР *286*
– теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) *283–286, 288, 293*
– теоретической физики Университета Копенгагена (Københavns Universitets Institut for Teoretisk Fysik, ныне — Институт Нильса Бора) *223*
– теплоэнергетики АН УССР (ныне — Институт технической теплофизики НАН Украины) *179*
– технологий Карнеги (Carnegie Institute of Technology, CIT) *278*
– точной механики и вычислительной техники (ИТМиВТ) *179, 182, 274, 282*
– электротехники АН УССР *179, 181, 182*
– энергетики АН УССР *181*
интегратор *125, 127, 134, 159, 161, 183, 272, 278*
– Томсона *127, 135*
информатика *38, 459*
ионные
– каналы *393–395*
– насосы (помпы) *393*
Ипек, Якуп (Yakup İpek) *259*
Исиду, Йосио (石田 芳夫, род. в 1948) *347*
Исикава, Хидэцурумару (石川日出鶴丸, Hidetsurumaru Ishikawa, 1878–1947) *385, 387*
Истлейк, Дональд (Donald Eastlake) *482*
итеративное углубление (iterative deepening) *243*
ИТЭФ, шахматная программа *286, 297*
Ишервуд, Кристофер (Christopher William Bradshaw Isherwood, 1904–1986) *424*

Й

Йельский университет (Yale University) *407, 417, 472, 475*
Йео, Джеральд (Gerald Francis Yeo, 1845–1909) *365*
Йохансен, Дэррил (Darryl Keith Johansen, род. в 1959) *312*

К

Каисса, шахматная программа *288–293*
калах, игра *228*
Калифорнийский университет
– в Беркли (University of California, Berkeley) *217, 400*
– в Лос-Анджелесе (University of California, Los Angeles, UCLA) *470*
Кальмар, Ласло (László Kalmár, 1905–1976) *207*
Канн, Маргарет (Margit Kann, 1880–1956) *209*
Каракалос, Хараламбос (Χαράλαμπος Καράκαλος) *63, 65*
Карамзин, Николай Михайлович (1766–1826) *51*
Карлсон, Аякс (Anton Julius "Ajax" Carlson, 1875–1956) *412, 413*
Карман
– Кристиан (Christián C. Carman) *66*
– Теодор фон (Theodore von Kármán, Kármán Tódor, 1881–1963) *210*
Карнап, Рудольф (Rudolf Carnap, 1891–1970) *408, 414, 423*
Карно, Лазар (Lazare Nicolas Marguerite Carnot, 1753–1823) *81*
Карпентер, Уильям Бенджамин (William Benjamin Carpenter, 1813–1885) *102*
Карпов, Анатолий Евгеньевич (род. в 1951) *250, 300, 308, 310, 314, 322, 327, 330*
Каррера, Пьетро (Pietro Carrera, 1573–1647) *295*
Карякин, Сергей Александрович (род. в 1990) *334*
Касиски, Фридрих (Friedrich Wilhelm Kasiski, 1805–1881) *172*
Каспаров, Гарри Кимович (род. в 1963) *250, 268, 308–311, 313–334, 340*
Каспарова, Клара (Аида) Шагеновна (1937–2020) *330*
Касымджанов, Рустам Машрукович (род. в 1979) *334*
Като, Гэнъити (加藤元一, Gen'ichi Katō, 1890–1979) *381, 385, 387–390, 394*
Катон, Ричард (Richard Caton, 1842–1926) *360–363, 366, 369*

квакерский колледж в Хаверфорде (Haverford College) *407*
кварто, игра *228*
КВО, шахматная программа *288*
Кейдин, Мартин (Martin Caidin, 1927–1997) *355*
Кейтс, Джозеф (Josef Kates, 1921–2018) *202*
Келдыш, Мстислав Всеволодович (1911–1978) *279, 283*
Кёлликер, Рудольф фон (Rudolf Albert von Kölliker, 1817–1905) *363*
Кельвин, Уильям (William Thomson, 1st Baron Kelvin, 1824–1907) *125*
Кембриджский университет (University of Cambridge) *79, 402*
кембриджский
– Кингс-колледж (King's College Cambridge) *155, 231*
– Тринити-колледж (Trinity College, Cambridge) *79*
Кемпелен, Вольфганг фон (Johann Wolfgang von Kempelen, 1734–1804) *259, 261–264*
Кёниг, Денеш (Dénes Kőnig, 1884–1944) *207*
Кеннеди, Джон (John Fitzgerald Kennedy, 1917–1963) *304*
Кеннон, Уолтер (Walter Bradford Cannon, 1871–1945) *442*
Кеплер, Иоганн (Johannes Kepler, 1571–1630) *68, 70, 73–75*
Керр, Уолтер (Walter Talbot Kerr, 1839–1927) *126*
Кёстлер, Артур (Arthur Koestler, 1905–1983) *424*
Киевский институт автоматики *286*
Кин
– Гарольд (Harold Hall "Doc" Keen, 1894–1973) *169*
– Реймонд (Raymond Dennis Keene, род. в 1948) *253, 328*
Кинг
– Дэниэл (Daniel John King, род. в 1963) *325*
– Рональд (Ronald "Suki" King, род. в 1956) *248, 249, 254, 255*
– Уильям (William King, 1805–1893) *102*
киркат, игра *229*
китайская комната *25*
китайские шахматы, игра *242*
Клайтон, Генри (Henry Helm Clayton, 1861–1946) *164*
Кларк
– Артур (Arthur Charles "C." Clarke, 1917–2008) *318, 479*
– Уэсли (Wesley Allison Clark, 1927–2016) *449–451*
класс общерекурсивных функций *151*
Клемент, Джозеф (Joseph Clement, 1779–1844) *87*
Клини, Стивен (Stephen Cole Kleene, 1909–1994) *154, 432–434*
Клири, Чип (Chip Cleary) *475*
Кнут, Дональд (Donald Ervin Knuth, род. в 1938) *237, 249*
кодировщик *38*
Коздровицкий, Эд (Edward W. Kozdrowicki, род. в 1937) *217*
Кокшотт, Пол (William Paul Cockshott, род. в 1952) *25*
Колледж
– Вашингтон-сквер Нью-Йоркского университета (Washington Square College, New York University) *411*
– врачей и хирургов Колумбийского университета (Columbia University Vagelos College of Physicians and Surgeons) *407*
– Святого Иоанна (St John's College) *79*
– сельского хозяйства и механических искусств штата Айова (Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts, ныне — Университет штата Айова) *160*
Коллинз, Джон (John Churton Collins, 1848–1908) *106*
Колмогоров, Андрей Николаевич (1903–1987) *283, 465, 466*
Колумбийский университет (Columbia University) *111, 275, 276, 315, 407, 424, 451*
Кольмар, Шарль де (Charles Xavier Thomas de Colmar, 1785–1870) *77, 266*
Комиссарчик, Эдуард Александрович (род. в 1949) *216, 217*
комлевая зона игры *301*
Кондон, Эдвард (Edward Uhler Condon, 1902–1974) *195–197, 264*
коннектом *396, 399–402, 404*
Контос, Димитриос (Δημήτρης Ελευθερίου η Κοντός) *55, 56*
Конфуций (孔子, ок. 551 до н.э. — 479 до н.э.) *481*
кооперативная (коалиционная) игра *190*
Корнеллский университет (Cornell University) *452, 467, 468, 486, 489*
Корнмюллер, Алоис (Alois Eduard Kornmüller, 1905–1968) *372*
Королевская школа города Арма (The Royal School, Armagh) *129*
Королевский военно-морской колледж
– в Гринвиче (Royal Naval College, Greenwich) *129*
– в Дартмуте (Royal Naval College, Dartmouth) *129*
корреляция *236, 341*
Корсаков, Семён Николаевич (1787–1853) *114–116*
Корчной, Виктор Львович (1931–2016) *327*
Косоногов, Иосиф Иосифович (1866–1922) *409*
Коток, Алан (Alan Kotok, 1942–2006) *279*
Коупленд, Джек (Brian Jack Copeland, род. в 1950) *177*
Коуэн, Джек (Jack D. Cowan, род. в 1933) *412*

Крамник, Владимир Борисович (род. в 1975) *322, 334, 341*
Краутхаммер, Чарльз (Charles Krauthammer, 1950–2018) *309*
крестики-нолики, игра (tic-tac-toe) *190, 191, 198, 199, 201–203, 212, 214, 221, 222, 227*
кривая Хорвега — Вейса — Лапика *375*
Крик, Рег (Reginald “Reg” Crick, род. в 1927?) *91*
Криницкий, Николай Андреевич (1914–1993) *273, 300*
криптография *108*
Криптологическая бомба, компьютер (bomba kryptologiczna) *168*
Крис, Иоганн (Johannes Adolf von Kries, 1853–1928) *373*
Кристиансен, Ларри (Larry M. Christiansen, род. в 1956) *321*
Кройтор, Роман (Roman Kroitor, 1926–2012) *480*
Крокер, Стивен (Stephen Crocker) *482*
Кронрод, Александр Семёнович (1921–1986) *283–288*
Кубрик, Стенли (Stanley Kubrick, 1928–1999) *479*
Кукушкин, В. Д. *274*
Кулом, Реми (Rémi Coulom, род. в 1974) *350*
Кунг (孔祥重, Kong Xiangchong, Hsiang-Tsung Kung, род. в 1945) *306*
Курочкин, Владимир Михайлович (1926–1999) *274, 287*
Курцвейл, Реймонд (Raymond Kurzweil, род. в 1948) *16, 20*
Курчатов, Игорь Васильевич (1903–1960) *284*
Куссуль, Эрнст Михайлович (род. в 1938) *453*
Кьюби, Лоуренс (Lawrence Kubie, 1896–1973) *421*
Кэмпбелл, Мюррей (Murray Campbell, род. в 1957) *307, 310, 326*
Кэрролл, Льюис (Lewis Carroll, наст. имя Charles Lutwidge Dodgson, 1832–1898) *484*
Кюри, Пьер (Pierre Curie, 1859–1906) *379*

Л

Лаборатория № 2 АН СССР (ныне — Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт») *283*
Лавлейс, Августа Ада (Augusta Ada King, Countess of Lovelace, 1815–1852) *99, 101–103, 201*
Лагранж, Жозеф Луи (Joseph Louis Lagrange, 1736–1813) *79*
Лакайль, Никола Луи де (Nicolas-Louis De la Caille, 1713–1762) *83*
Лакруа, Сильвестр (Sylvestre François de Lacroix, 1765–1843) *79*
Лаланд, Жозеф Жером Лефрансуа де (Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande, 1732–1807) *83*
Ланг, Фриц (Friedrich Christian Anton “Fritz” Lang, 1890–1976) *139*
Ландау
– Игорь Яковлевич (1929–1994) *215*
– Лев Давидович (1908–1968) *284*
– Лоуренс (Lawrence Landaw) *25*
Лао-цзы (кит. упр. 老子, пиньинь Lǎo Zǐ) *50*
Лапик, Луи (Louis Lapicque, 1866–1952) *372, 375–381, 391, 413*
Лаплас, Пьер-Симон (Pierre-Simon de Laplace, 1749–1827) *80*
лаплациометр *160, 161*
Ларднер, Дионисий (Dionysius Lardner, 1793–1859) *89*
Ларсен, Бент (Jørgen Bent Larsen, 1935–2010) *303, 308, 312*
латрункули, игра (ludus latrunculorum, latrunculi, latrones) *229*
Лаудер, Элберт (Elbert Lowder, 1932–2006) *241*
Лафферти, Дон (Don Morgan Lafferty, 1933–1998) *250, 252, 254, 255*
Лебедев
– Алексей Иванович (1866–1940) *179, 180*
– Сергей Алексеевич (1902–1974) *179, 181–184, 274, 280, 282*
Лебедева, Татьяна Алексеевна (1902–1996) *180*
Лёбнер, Хью (Hugh Loebner, 1942–2016) *216*
Лебоди
– Амисия (Amicie Lebaudy (Piou), 1847–1917) *375*
– Макс (Max Philippe Lebaudy, 1873–1895) *375*
Леви, Дэвид (David Neil Lawrence Levy, род. в 1945) *216, 217, 253, 290, 310, 315, 317, 322, 325, 329, 350*
Левитт, Лео (Leo Barton Levitt, 1931–2016) *246, 248*
Лежандр
– Адриен Мари (Adrien-Marie Legendre, 1752–1833) *81*
– Рене (René Legendre, 1880–1954) *379*
Лейбниц, Готфрид Вильгельм (Gottfried Wilhelm von Leibniz, 1646–1716) *77, 79, 110, 142, 146, 216, 264, 349, 358, 414*
Лейденский университет (Leiden University) *370*
Лекун, Ян (Yann André LeCun, род. в 1960) *32*
Леман, Андрей Андреевич *288*
Леопольд, Джулс (Jules Leopold (Meislik) *253*
Летвин, Джером (Jerome Ysroael Lettvin, 1920–2011) *408, 413, 414, 419, 421, 423, 424, 426–430*
Либерман, Майкл (Michael Aaron Lieberman, род. в 1940) *279*
Ливитт, Дэвид (David Leavitt, род. в 1961) *176*
лиганд-зависимые (лиганд-управляемые) ионные каналы *393*

Лидделл, Говард (Howard Scott Liddell, 1895–1967) *421*
Лиман, Шелби (Shelbourne "Shelby" Richard Lyman, 1936–2019) *322*
линейный классификатор *465*
Липпман, Габриэль (Jonas Ferdinand Gabriel Lippmann, 1845–1921) *369, 381*
Липсетт, Артур (Arthur Lipsett, 1936–1986) *480*
Лихтерман, Рут (Ruth Lichterman, 1924–1986) *165*
Лоброн, Эрик (Eric Lobron, род. в 1960) *311*
Лозаннский университет (Université de Lausanne) *404*
Лой, Джим (Jim Loy) *250*
Лолли, Джамбаттиста (Giambattista Lolli, 1698–1769) *295*
Лонг, Аса (Asa Long, 1904–1999) *250*
Лондонский университет (University of London) *102*
Лоусон, Доминик (Dominic Lawson, род. в 1956) *309*
Лузин, Николай Николаевич (1883–1950) *283*
Лукас
– Джордж (George Walton Lucas Jr., род. в 1944) *480*
– Кит (Keith Lucas, 1879–1916) *381–383, 385*
Лукач, Дьёрдь (Szegedi Lukács György Bernát, 1885–1971) *474*
Лукьянов, Владимир Сергеевич (1902–1980) *161*
Луначарский, Анатолий Васильевич (1875–1933) *181*
Льюис, Уильям (William Lewis, 1787–1870) *262*
ЛЭМ-1, вычислительная машина *184*
Лэнг, Ричард (Richard Lang, род. в 1956) *248*
Лэндал, Герберт (Herbert Daniel Landahl, 1913–2003) *435*
Лю, Пол (Paul Lu) *246, 247*
Людвиг, Карл (Carl Friedrich Wilhelm Ludwig, 1816–1895) *366*
лямбда-исчисление *154, 157*
Ляпунов, Алексей Андреевич (1911–1973) *300, 301*

M

магараджа, игра *227*
Майер
– Стефан (Stefan Antoni Mayer, 1895–1981) *168*
– Тобиас (Tobias Mayer, 1723–1762) *83*
Майлз
– Тони (Anthony "Tony" John Miles, 1955–2001) *309*
– Яна (Jana Miles (Malypetrová), позднее Jana Bellin, род. в 1947) *306*
Мак-Каллок
– (Брэдли), Мэри Хьюз (Mary Hughes McCulloch (Bradley), 1865–1959) *407*
– Джеймс (James William McCulloch, 1857–1938) *407*
– Рут (Ruth "Rook" Boehm McCulloch (Metzger), 1899–1991) *414, 427*
– Уоррен (Warren Sturgis McCulloch, 1898–1969) *406, 407, 413–417, 420–435, 437, 438, 443, 446, 447, 453, 456, 458, 477, 478, 480, 485*
Макиавелли
– алгоритм для игры в шахматы (Machiavelli) *271*
– Никколо (Niccolò di Bernardo dei Machiavelli, 1469–1527) *271*
Маккарти
– Джозеф (Joseph Raymond McCarthy, 1908–1957) *452*
– Джон (John McCarthy, 1927–2011) *15, 27, 216, 237, 277, 279, 285, 286, 289, 468, 472, 479*
– Юджин (Eugene Joseph McCarthy, 1916–2005) *468*
Маккордак, Памела (Pamela McCorduck, 1940–2021) *18, 277, 476*
Макналти, Кей (Kathleen "Kay" McNulty Mauchly Antonelli, 1921–2006) *165*
мальтузианство *110*
Мальтус, Томас (Thomas Robert Malthus, 1766–1834) *110*
Манро, Гектор Хью (Hector Hugh Munro, 1870–1916) *467*
Мансон, Джон (John Munson, 1939–1972) *463*
Мао, Лей (Lei Mao) *464*
Марадона, Диего (Diego Armando Maradona, 1960–2020) *329*
Маре, Этьен-Жюль (Etienne-Jules Marey, 1830–1904) *369*
Маркс
– Дьёрдь (György Marx, 1927–2002) *211*
– Карл (Karl Marx, 1818–1883) *476*
Маркузик, Эд (Edward J. "Ed" Markusic, 1925–1994) *248*
Марлетт, Дуг (Douglas Nigel "Doug" Marlette, 1949–2007) *319*
Марсланд, Тони (Thomas Anthony "Tony" Marsland, род. в 1939) *310*
Марьяж, программа для игры в преферанс *349*
Маск, Илон (Elon Reeve Musk, род. в 1971) *107*
Маскелайн, Нэвил (Nevil Maskelyne, 1732–1811) *83*
Массачусетский технологический институт (Massachusetts Institute of Technology, MIT) *113, 217, 279, 396, 397, 417–419, 423, 424, 426, 428, 429, 443, 449, 472, 475, 476, 478, 479, 482, 484*
Математический институт
– им. В. А. Стеклова АН СССР (МИАН) *279*
– Обервольфаха (Mathematisches Forschungsinstitut Oberwolfach) *73*
Матурана, Умберто (Humberto Maturana, 1928–2021) *428*

Махнычев, Владимир Сергеевич (род. в 1981) *220*
машина
– Тьюринга [Turing machine] *156–158, 167, 337, 416, 485*
– Шиккарда *73, 75*
машинное обучение *29*
МВТУ, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана *181*
МГУ, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова *184, 220, 283, 418*
Медицинский институт Говарда Хьюза (Howard Hughes Medical Institute) *402*
Медицинский колледж Альберта Эйнштейна (Albert Einstein College of Medicine) *402*
Мейер, Джоуи (Joey Meyer) *259*
мейнфрейм *279, 288, 290, 312*
Мельцель, Иоганн (Johann Nepomuk Mälzel, 1772–1838) *261–263*
мембранный потенциал клетки *392*
мемистор, устройство (memistor) *456*
мемристор, устройство (memristor) *456*
Менабреа, Луиджи Федерико (Luigi Federico Menabrea, 1809–1896) *99–102*
Меньшов, Дмитрий Евгеньевич (1892–1988) *283*
Меритт, Бенджамин (Benjamin Dean Meritt, 1899–1989) *62*
Мерриам, Уильям (William Rush Merriam, 1849–1931) *120*
Мерсенн, Марен (Marin Mersenne, 1588–1648) *75*
Мёрфи, Гленн (Glenn Murphy, 1908–1978) *160*
метод
– обратной индукции *209*
– сингулярного поиска (singular search) *308*
методология динамического программирования *212*
Метон Афинский (Μέτων ὁ Ἀθηναῖος) *63*
Мид, Маргарет (Margaret Mead, 1901–1978) *421, 446*
миелинизированные волокна *390, 394*
миелиновая оболочка *390*
Мизес, Жак (Jacques Mieses, 1865–1954) *328, 329*
микротом *396*
Милбенк, Анна Изабелла (Anne Isabella Noel Byron (Milbanke), 1792–1860) *101*
Милбэнк, Ральф Гордон (Ralph Gordon King Noel Milbanke, 1839–1906) *102*
Миллен, Джонатан (Jonathan K. Millen, род. в 1942) *346*
Миллер
– Герхард Фридрих (Gerhard Friedrich Müller, в русифицированной форме Фёдор Иванович Миллер, 1705–1783) *51*
– Джордж (George Armitage Miller, 1920–2012) *441*
Миллетт, Эдриан (Adrian Millett) *246, 247*
Милль, Джон Стюарт (John Stuart Mill, 1806–1873) *101*
Милов, Вадим Маркович (род. в 1972) *335*
Минделл, Дэвид (David A. Mindell, род. в 1966) *132*
минимакс *235*
Мински, Хайман (Hyman Philip Minsky, 1919–1996) *423*
Минский, Марвин (Marvin Lee Minsky, 1927–2016) *253, 441, 442, 472, 475, 477–479, 482, 484–488, 490*
Мите, Адольф (Adolf Miethe, 1862–1927) *411*
Митчелл
– Джон (John Kearsley Mitchell, 1798–1858) *262*
– Силас (Silas Weir Mitchell, 1829–1914) *262, 263*
Мичи, Дональд (Donald Michie, 1923–2007, вообще-то его фамилия читается как «Мики», но в отечественной литературе уже утвердился вариант «Мичи») *203, 216, 217, 268, 271*
Мо-цзы (墨子, ок. 470 до н. э. — ок. 391 до н. э.) *358*
модель
– «интегрировать-и-сработать» [integrate-and-fire] *380*
– «интегрировать-и-сработать с утечками» [leaky integrate-and-fire] *391*
– «интегрировать-и-сработать с утечками дробного порядка» [fractional-order leaky integrate-and-fire] *391*
– Гальвеса — Лёхербах [Galves–Löcherbach model] *391*
– Ходжкина — Хаксли *392, 394*
Мойяр, Луи Пьер (Louis Pierre Mouillard, 1834–1897) *356*
Мокли, Джон (John William Mauchly, 1907–1980) *159, 163, 164, 166, 195, 422*
Моксон, Джозеф (Joseph Moxon, 1627–1691) *72*
Монтегю, Джим (James “Jim” Jackson Montague, 1873–1941) *451*
Морган
– Огастес де (Augustus de Morgan, 1806–1871) *101, 201, 202*
– София Элизабет де (Sophia Elizabeth De Morgan, 1809–1892) *102, 201*
Моргенштерн, Оскар (Oskar Morgenstern, 1902–1977) *153, 209, 212*
Морен, Жан-Батист (Jean-Baptiste Morin, 1583–1656) *75, 83*
Морком, Кристофер (Christopher Collan Morcom, 1911–1930) *155, 167*
Морланд, Сэмюэл (Samuel Morland, 1625–1695) *75, 146*

Мороси, Джузеппе (Giuseppe Morosi, 1772–1840) *263*
Моррелл, Фрэнк (Francis Oliver "Frank" Morrell, 1906?–?) *172*
Морш, Франц (Frans Morsch, род. в 1954) *316, 332*
Моцарт, Вольфганг Амадей (Wolfgang Amadeus Mozart, 1756–1791) *468*
Мундсток, Джеймс (Edwin James Mundstock, род. в 1943) *259*
Мур
– Гордон (Archibald Gordon Henry Wilson Moore, 1862–1934) *131*
– Рональд (Ronald W. Moore) *237*
– Эдвард (Edward Forrest Moore, 1925–2003) *277*
Мурад IV (османск. مراد رابع, тур. Dördüncü Murat, 1612–1640) *71*
Муре, Жак (Jacques François Mouret, 1787–1837) *262*
Мэнсфилд, Майкл (Michael Joseph Mansfield, 1903–2001) *488–490*
МЭСМ, Малая электронная счётная машина *181–183, 279, 282*
Мэтьюз, Брайан (Bryan Harold Cabot Matthews, 1906–1986) *389*
Мюррей, Харольд (Harold James Ruthven Murray, 1868–1955) *200, 201*

Н

Нагарджуна (नागार्जुन, ок. 150 — ок. 250) *358*
Надареишвили, Гия Антонович (1921–1991) *302*
Назон, Публий Овидий (Publius Ovidius Naso, 43 до н.э. — ок. 18 н.э.) *198, 200, 355*
Найт, Брюс (Bruce W. Knight) *380*
Налимов, Евгений Викторович (род. в 1965) *220*
нарды, игра *202, 242, 305, 350*
Насух, Матракчи (полное имя Насух бин Карагёз бин Абдуллах эль-Боснави, тур. Nasuh bin Karagöz bin Abdullah el-Bosnavî, 1480–1564) *71, 72*
Науменко, Владимир Павлович (1852–1919) *409*
Национальное бюро стандартов США, Национальный институт стандартов и технологий (National Institute of Standards and Technology, NIST) *196*
негамакс *235*
Нейман
– Джон фон (John von Neumann, 1903–1957) *148, 156, 195, 209, 210, 212, 235, 272, 278, 421, 422, 433, 455, 456*
– Микса (Miksa Neumann, 1870–1929) *209, 210*
нейроглия, глия *372*
нейрон *26, 342, 357, 360, 363, 364, 372, 373, 376–378, 380, 388, 389, 391–393, 395–399, 401–404, 406, 413–416, 420, 422, 428, 431, 432, 434–436, 438, 439, 441, 443, 447, 448, 450, 455, 456, 458, 462, 465, 466, 470, 485, 487, 488*
нейронаука *400, 466*
нейронная доктрина *364*
нейроны, которые возбуждаются вместе, связываются вместе, правило [Neurons that fire together, wire together] *438*
некооперативная игра *190*
Нельбек, Иоганн (Johann "Hans" Nelböck, 1903–1954) *152, 153*
Нельсон, Гарри (Harry Lewis Nelson, род. в 1932) *303*
немиелинизированные волокна *390*
неолуддит *324*
Непер, Джон (John Napier, 1550–1617) *69–72*
непоуальцинцин *47–49*
Нернст, Вальтер (Walther Hermann Nernst, 1864–1941) *395, 413*
неселективные ионные каналы *393*
Нили, Роберт (Robert "Bob" W. Nealey, 1908/1909–1980) *239, 240*
Нильссон, Нильс (Nils John Nilsson, 1933–2019) *461, 476*
ним, игра *193, 195, 196, 198, 227*
Ниматрон, машина для игры в ним *193, 195, 196, 264*
Нимбурски, Адель (Adele Nimbursky, 1899–1981) *153*
Нимрод, машина для игры в ним *196*
Ниссен
– Томас (Thomas Dahl Nissen) *470*
– Чарльз (Charles William Niessen, род. в 1940) *279*
Нобл, Сид (Sid Noble) *275*
Новиков, Сергей Петрович (род. в 1938) *279*
Новосибирский государственный университет *286, 300*
Норвиг, Питер (Peter Norvig, род. в 1956) *16, 17, 27, 231, 476*
Норман, Дон (Donald "Don" Arthur Norman, род. в 1935) *475*
Норт, Саймон (Simon Newton Dexter North, 1849–1924) *120, 121*
Ньюборн, Монти (Monroe "Monty" Newborn, род. в 1938) *315, 317, 324, 325, 333*
Ньюкомер, Гарри (Harry Sidney Newcomer, 1887–1988) *384*
Ньюман, Макс (Maxwell "Max" Herman Alexander Newman, 1897–1984) *156, 173, 174*
Ньютон, Исаак (Isaac Newton, 1642–1727) *82*
Ньюэлл, Аллен (Allen Newell, 1927–1992) *237, 277, 278, 305, 472, 475, 480, 482*
Нэш, Джон (John Forbes Nash, 1928–2015) *206, 222, 224, 227*

О

О'Брайен, Ричард (Richard O'Brien) *489, 490*
обучающая выборка *31*
обучение
– без учителя [unsupervised learning] *32, 33*
– в режиме «сам себе учитель», также самообучение, самоконтролируемое обучение (self-supervised learning), *32*
– с подкреплением [reinforcement learning] *32, 203*
– с учителем [supervised learning] *31, 32, 33*
– с частичным привлечением учителя [semi-supervised learning] *33*
Огилви, Фредерик (Frederick Charles Ashley Ogilvy, 1866–1909) *130*
Оден, Уистен (Wystan Hugh Auden, 1907–1973) *424*
Оже, Пьер (Pierre Victor Auger, 1899–1993) *379*
Олдбери, Дерек (Derek Edward "DEO" Oldbury, 1924–1994) *240, 244–247, 249, 252–254*
олигодендроциты *390*
Органотерапевтический институт (ныне — Институт проблем эндокринной патологии имени В. Я. Данилевского НАМН Украины) *366*
Орем, Николай (Nicole Oresme, до 1330–1382) *70*
Осегера-Наварро, Карлос (Carlos Oceguera Navarro) *470*
основной закон возбуждения *373*
отелло (реверси), игра *242*
оценочная функция (evaluation function) *232, 236, 242, 297, 320, 351*

П

Павлов, Иван Петрович (1849–1936) *389, 440, 448, 449*
Палмер, Уильям (William Waldegrave Palmer, 2nd Earl of Selborne, 1859–1942) *128*
палочки Непера *72*
Паннке, Курт (Kurt Pannke, 1889–?) *142*
Папп Александрийский (Πάππος ὁ Ἀλεξανδρεύς, 290–350) *67, 480*
параллельная игра *191*
Парди, Ива Лусена (Iva Lucena Purdy, 1881–1983) *159*
Парижский университет (Université de Paris) *75, 264*
Паркер
– Генри (Henry Parker, 1849–?) *199, 200*
– Марла (Marla C. Parker, род. в 1961) *198*
Паск, Ричард (Richard Pask, род. в 1961) *244*
Паскалина *73, 76, 77*
Паскаль
– (Бегон), Антуанетта (Antoinette Pascal (Bégon), 1596–1626) *75*
– Блез (Blaise Pascal, 1623–1662) *73, 75–77, 82, 146*
– Этьен (Étienne Pascal, 1588–1651) *75*
Пауэрс, Джеймс (James Legrand Powers, 1871–1927) *121*
Пейперт, Сеймур (Seymour Aubrey Papert, 1928–2016) *217, 475, 477–479, 482, 484–488, 490*
Пенроуз, Роджер (Roger Penrose, род. в 1931) *25, 26*
пентаго, игра *228*
Пентланд, Алекс (Alex Paul "Sandy" Pentland, род. в 1951) *476*
перебор с единичным окном *244*
перехваты Ранвье *390, 394*
периферическая нервная система *390*
Перрен, Жан (Jean Baptiste Perrin, 1870–1942) *379*
Персиваль, Фрэнк (Frank A. Percival, 1923?–2013?) *64*
перфокарта *93, 96, 98, 100, 114, 117, 120, 121, 139, 149, 281, 284*
перцептрон, персептрон [perceptron] *431, 450–453, 455, 458–460, 464–466, 477, 484–489*
пессои, игра (πεσσοί) *229*
петейя, игра (πεττεία) *229*
Петерс, Арно (Arno Peters, 1916–2002) *144*
Петти, Уильям (William Petty, 1623–1687) *110*
Пиджин, Чарльз (Charles Felton Pidgin, 1844–1923) *116, 117, 119, 120*
Пикок, Джордж (George Peacock, 1791–1858) *79*
пиксель *38, 351, 402, 453*
Пильсбери, Гарри (Harry Nelson Pillsbury, 1872–1906) *263*
Пионер, шахматная программа *301, 302*
Питерхаус, колледж Кембриджа (Peterhouse, Cambridge) *79*
Питтс, Уолтер (Walter Harry Pitts, 1923–1969) *406–408, 413–416, 419–424, 426–435, 437, 438, 443, 446, 447, 453, 456, 458, 477, 485*
Питтсбургский университет (University of Pittsburgh) *411, 412*
Плана, Джованни (Giovanni Antonio Amedeo Plana, 1781–1864) *100*
Платон (Πλάτων, 428/427 или 424/423 до н. э. — 348/347 до н. э.) *229*
плоский гомеоскоп *115*
Плотников, Михаил Александрович (1864–1903) *180*
по три камешка, игра (Terni lapilli, «Игра Овидия») *198*
Пойа, Дьёрдь (George Pólya, Pólya György, 1887–1985) *211*
покер, игра *349*
Полгар, Юдит (Judit Polgár, род. в 1976) *312, 322*

Полибий (Πολύβιος, ок. 200 до н.э. — ок. 120 до н.э.) *54*
Политехнический университет Мадрида (Universidad Politécnica de Madrid) *265*
Поллен
– Артур (Arthur Joseph Hungerford Pollen, 1866–1937) *125–133, 135*
– Энтони (Anthony Pollen, 1900–1998) *133*
полуход (ply) *231, 236, 271, 277, 293*
Пономарёв, Руслан Олегович (род. в 1983) *334*
Портер, Роберт (Robert Percival Porter, 1889–1893) *116, 117*
Посидоний (Ποσειδώνιος) *62, 67*
последовательная игра *191*
потенциал-зависимые (потенциал-управляемые) ионные каналы *393, 395*
Правдич-Неминский, Владимир Владимирович (1879–1952) *366, 367*
Правительственная школа кодов и шифров (Government Code and Cypher School, GC&CS) *168*
Пражский
– политехнический институт *410*
– университет *410*
Прайс, Дерек (Derek John de Solla Price, 1922–1983) *61–64*
Пранди, Фортунато (Fortunato Prandi, 1799–1868) *99*
преобразование Хафа (Hough Transform) *464*
преферанс, игра *192, 349*
прецедент *31, 33, 446, 464, 465*
Принстонский университет (Princeton University) *153, 154, 156, 210, 396, 402, 441*
Принц, Дитрих (Dietrich Gunther Prinz, 1903–1989) *272*
принцип проводимости «всё или ничего» [all or nothing] *381–383*
проблема разрешения *157*
программа
– для игры в го Альберта Зобриста *346*
– для игры в го Брюса Уэбстера *346*
– типа B *270*
программирование в содержательных обозначениях *287*
Прони, Гаспар де (Gaspard Clair François Marie Riche, baron de Prony, 1755–1839) *78, 80, 83–85, 137*
простой компаратор *115*
пространственная структура белков [protein structure prediction] *4*
прямолинейный гомеоскоп
– с неподвижными частями *115*
– с подвижными частями *115*
Птолемей, Клавдий (Κλαύδιος Πτολεμαῖος, ок. 100 — ок. 170) *58, 68*
Пуассон, Симеон Дени (Siméon Denis Poisson, 1781–1840) *395*
Пушкаш, Тивадар (Ditrói Puskás Tivadar, 1844–1893) *147*
Пфейффер, Джон (John Edward Pfeiffer, 1914–1999) *443*
Пфистер
– Иоганн (Johan Pfister) *74*
– Гельмут (Helmut Pfleger, род. в 1943) *310*
Пфлюгер, Эдуард (Eduard Friedrich Wilhelm Pflüger, 1829–1910) *373, 374*
Пшибыла, Бронислав (Bronislaw Przybyla) *346*

P

равновесие Нэша *207*
Радос, Константинос (Κωνσταντίνος Ν. Ράδος, 1862–1931) *60*
Разностная машина (Difference engine) *89, 91, 92, 149*
Райс, Боб (Robert Eric “Bob” Rice, род. в 1954) *317*
Райт, Майкл (Michael T. Wright, род. в 1948) *63–66, 91*
Рамеев, Башир Искандарович (1918–1994) *179, 297*
Рамон-и-Кахаль, Сантьяго (Santiago Ramón y Cajal, 1852–1934, иногда упоминается как «Кахаль»/Cajal, что некорректно, так как это фамилия матери) *363–365*
Ранвье, Луи Антуан (Louis-Antoine Ranvier, 1835–1922) *390, 394*
Рапопорт, Анатоль (Anatol Rapoport, при рождении Анатолий Борисович Рапопорт, 1911–2007) *438*
Рассел, Бертран (Bertrand Arthur William Russell, 1872–1970) *407, 408, 414*
Рашевская (Константинович), Надежда Николаевна (1875–?) *409*
Рашевский
– Николай Петрович (1899–1972) *408–414, 435*
– Пётр Николаевич (1867–?) *409*
Раштон, Уильям (William Albert Hugh Rushton, 1901–1980) *379*
РВМ-1, релейная вычислительная машина *284*
реверс-инжиниринг *352*
Редиадис, Периклес (Περικλής Δ. Ρεδιάδης, 1875–1938) *57, 59, 60*
Редхеффер, Реймонд (Raymond Moos Redheffer, 1921–2005) *196*
Реевский, Мариан (Marian Adam Rejewski, 1905–1980) *167–169*
Резницкий, Александр Исаакович *301, 302*
Рёйгард-Петерсен, Ханс (Hans H. Røigaard-Petersen) *470*
Рем, Альберт (Albert Rehm, 1871–1949) *60, 61*
реобаза *377*
реотом (rheotome, буквально «резак для тока») *376*
Рети, Рихард (Richard Réti, 1889–1929) *302, 325*
ретикулум [reticulum] *363*

ретроспективный анализ, ретроградный анализ, ретроанализ *212, 213*
Рив, Майк (Mike Reeve) *350*
Риск, Роберт Блэр (Robert Blair Risk) *105*
Ритчи, Деннис (Dennis MacAlistair Ritchie, 1941–2011) *217*
Ричардс, Ричард (Richard Kohler Richards, 1921–2012) *163*
Ришельё, Арман Жан дю Плесси де (Armand-Jean du Plessis, duc de Richelieu, 1585–1642) *75*
Робер-Уден, Жан Эжен (Jean-Eugène Robert-Houdin, 1805–1871) *263*
Робертс де Ван, Майкл (Michael de Van Roberts) *277*
Роде, Майкл (Michael Rohde, род. в 1959) *312, 321*
Родригес Вилья, Андрес (Andres Rodriguez Vila, род. в 1973) *335*
Розен, Чарльз (Charles A. Rosen, 1917–2002) *461*
Розенблатт
– Кэтрин (Katherine C. Rosenblatt (Golding)) *451*
– Морис (Maurice Rosenblatt, 1915–2005) *451*
– Фрэнк (Frank Rosenblatt, 1928–1971) *431, 450–453, 455, 456, 458–461, 464–470, 477, 484–486, 488–490*
– Фрэнк Фердинанд (Frank Ferdinand Rosenblatt, 1882–1927) *451*
Розенблют, Артуро (Arturo Rosenblueth, 1900–1970) *421, 424, 427, 430, 446*
Розенфельд, Марианна Зиновьевна (род. в 1937) *288*
Розопулос, Отон Ὄθων Ρουσόπουλος, 1856–1922) *60*
Рокитанский, Карл фон (Carl von Rokitansky, 1804–1878) *365*
Романов, Николай Васильевич (1864–1916) *180*
Ромейн, Джон (Johannes Willem "John" Romein, род. в 1970) *255*
Россер, Джон (John Barkley Rosser Sr., 1907–1989) *154, 157*
Ростовцев (Кауфман), Павел Юрьевич (1877–1951) *366, 367*
Рохас, Рауль (Raúl Rojas, род. в 1955) *158*
Рочестер, Натаниэль (Nathaniel Rochester, 1919–2001) *450*
Ружицкий, Ежи (Jerzy Różycki, 1909–1942) *168*
Рузвельт, Теодор (Theodore Roosevelt, 1858–1919) *121*
Рукс, Майкл (Michael Lee Roukes) *401*
Рэй, Николас (Nicholas Ray, наст. имя Raymond Nicholas Kienzle, 1911–1979) *424*
Рэйд, Клэй (R. Clay Reid, род. в 1960) *403, 405*
Рэнделл, Брайан (Brian Randell, род. в 1936) *177*
рэндзю, игра *242*

С

Саган, Карл (Carl Edward Sagan, 1934–1996) *197*
Саед, Амар (Omar Syed) *349*
Саймон, Герберт (Herbert Simon, 1916–2001) *237, 277, 278, 472, 475, 480, 482*
сальтаторный характер проводимости *390*
Сантильяна, Джорджо де (Giorgio Diaz de Santillana, 1902–1974) *424*
СБИС (сверхбольшие интегральные схемы, very-large-scale integration, VLSI) *307, 311, 313, 320*
свёрточные нейронные сети *399*
Своронос, Иоаннис (Ιωάννης Σβορώνος, 1863–1922) *57, 60*
Се, Жермен (Germain Sée, 1818–1896) *375*
Северо-Американский чемпионат по шахматам среди компьютерных программ (NACCC, North American Computer Chess Championship) *217, 248, 289, 306, 307, 312*
Северо-Западный университет (Northwestern University, штат Иллинойс, США) *289*
Сегье, Пьер (Pierre Séguier, 1588–1672) *77*
Седжвик
– Ив (Eve Kosofsky Sedgwick, 1950–2009) *467, 490, 491*
– Хэл (Harold "Hal" A. Sedgwick) *467, 468, 490*
Сейлор, Марк (Mark Saylor, 1954–2013) *322*
Сейраван, Яссер (Yasser Seirawan, ياسر سيروان, род. в 1960) *316, 319, 322, 325, 326, 329*
селективные ионные каналы *393*
Селль, Кальман (Kálmán Széll, 1843–1915) *210*
Селфридж, Оливер (Oliver Gordon Selfridge, 1926–2008) *423, 424*
Семендяев, Константин Адольфович (1908–1988) *287*
Сентеф, Джозеф (Joseph Sentef, род. в 1954) *303*
Сеньобос, Шарль (Charles Seignobos, 1854–1942) *379*
Сёрль, Джон (John Rogers Searle, род. в 1932) *20, 22, 25, 26*
Сетунь, вычислительная машина *184*
сетчатка *396–398, 416, 428*
Сеунг, Себастьян (Sebastian Hyunjune Seung, род. в 1966) *396*
Сеченов, Иван Михайлович (1829–1905) *366*
сильное решение [strong solution] *220, 228, 340*
Симарро, Луис (Luis Simarro Lacabra, 1851–1921) *363*
симметричная игра *190*

Ситон, Чарльз (Charles William Seaton, 1831–1885) *112, 113*
Скиннер, Беррес (Burrhus Frederic Skinner, 1904–1990) *469*
Склодовская-Кюри, Мария (Maria Skłodowska-Curie, 1867–1934) *379*
Скотт, Перси (Percy Moreton Scott, 1853–1924) *127, 130*
скрэббл, игра *242*
слабое решение [weak solution] *220, 221*
слабый (также специализированный или прикладной) **ИИ** *20*
Слейгл, Джеймс (James Robert Slagle, род. в 1934) *237*
Слейт, Дэвид (David J. Slate) *289*
Слипак, Сергио (Sergio Slipak, род. в 1963) *335*
Смилга, Вольдемар Петрович (1929–2009) *282*
Смит
– Адам (Adam Smith, 1723–1790) *80, 85*
– Джон Мейнард (John Maynard Smith, 1920–2004) *271*
– Ноуэлл (Nowell Charles Smith, 1871–1961) *155*
Смитсоновский институт (Smithsonian Institution) *91, 333*
Снайдер, Бетти (Frances Elizabeth “Betty” Snyder, 1917–2001) *165*
Собел, Дава (Dava Sobel, род. в 1947) *84*
Солон (Σόλων, между 640 и 635 до н.э. — ок. 559 до н.э.) *54*
Сомервилль, Мэри (Mary Somerville, 1780–1872) *101, 103*
Спасский, Борис Васильевич (род. в 1937) *328*
Спичечнокоробочный обучающийся движок для крестиков-ноликов (Matchbox Educable Noughts And Crosses Engine, MENACE) *203*
спокойная [quiescent] **позиция** *269*
Стадиадис, Илиас (Ηλίας Λυκοπάντης η Σταδιώτης) *55*
Стаис
– Валериос (Βαλέριος Στάης, 1857–1923) *56*
– Спиридон (Σπυρίδων Στάης, 1859–1932) *56*
Стамирис, Георгиос (Γεώργιος Α. Σταμίρης, 1914–1996) *62*
Стевин, Симон (Simon Stevin, 1548/1549–1620) *70*
Стейн, Ричард (Richard B. Stein, 1940–2020) *380*
Стёрджес, Джошуа (Joshua Sturges, 1757/1758–1813) *255, 351*
Стил, Джек (Jack Elwood Steele, 1924–2009) *355*
стимул-управляемые ионные каналы *393*
Стин, Майкл (Michael Stean) *350*
столик Дрейера *131*
Стрейчи, Кристофер (Christopher S. Strachey, 1916–1975) *230–236*
Стройк, Дирк Ян (Dirk Jan Struik, 1894–2000) *417, 418*
Струве, Отто Людвигович (1897–1963) *410*
Стругацкие, братья (Аркадий Натанович Стругацкий, 1925–1991 и Борис Натанович Стругацкий, 1933–2012) *279*
Стэнфордский
– исследовательский институт (Stanford Research Institute, SRI) *461*
– университет (Stanford University) *456, 475*
Сулейман Великолепный (осман. سلیمان اول, тур. Birinci Süleyman, 1494–1566) *72*
Сулим, Михаил Кириллович (1924–2000) *282*
Сумида, Джон (Jon Tetsuro Sumida, род. в 1949) *132*
Суэйд, Дорон (Doron Swade, род. в 1946) *91*
Сэйл, Тони (Anthony Edgar “Tony” Sale, 1931–2011) *178*
Сэмюэл, Артур (Arthur Lee Samuel, 1901–1990) *29, 230, 231, 234–242, 244, 249, 253, 277*
Сюй, Фэнсюн (許峰雄, Xǔ Fēng Xióng, Feng-hsiung Hsu, род. в 1959, упоминается в ряде источников как Фен Сюн Сю) *304, 306–311, 313, 317, 320, 321, 323, 325, 326, 328, 329, 331, 337, 341*

Т

таблица перестановок, таблица перестановок/опровержений (transposition/refutation table) *232, 244*
табулятор Холлерита *109, 118, 138*
Таврический университет (ныне — Таврический национальный университет имени В. И. Вернадского) *409*
Тагард, Пол (Paul Richard Thagard, род. в 1950) *475*
Такемия, Масаки (武宮 正樹, род. в 1951) *347*
Такеуси, Тайджи (Taiji Takeuchi) *390*
Таль, Михаил Нехемьевич (1936–1992) *283, 286, 297*
Тань, Си-Джей (Chung-Jen “CJ” Tan, 譚崇仁, род. в 1941) *315, 317, 319, 330*
Тасаки, Исидзи (田崎 一二, Ichiji Tasaki, 1910–2009) *390*
Татт, Уильям (William Thomas “Bill” Tutte, 1917–2002) *172, 173*
Тафт, Уильям Говард (William Howard Taft, 1857–1930) *121*
тееко, игра *228*
Тейлор
– Брук (Brook Taylor, 1685–1731) *82*
– Джеймс (James Morford Taylor, 1843–1930) *160*
– Уилфред (Wilfred Kenelm Taylor) *450*
Тейхман, Альфред (Alfred Teichmann, 1902–1971) *142*
телекин *266*

Теллер, Эдвард (Edward Teller, Teller Ede, 1908–2003) *210*
теорема
– Цермело *206, 232, 464*
– Чёрча — Тьюринга *157*
теория
– неубывания [decrementless theory] *385*
– убывания [decrement theory] *385*
Теофанидис, Иоаннис (Ιωάννης Θεοφανίδης) *61, 62*
Тёрви, Питер (Peter James Turvey, род. в 1954) *91*
Теслер, Ларри (Lawrence "Larry" Gordon Tesler, 1945–2020) *18*
тест Тьюринга [Turing test] *22–25, 27, 158, 261*
Техническая высшая школа Берлин-Шарлоттенбурга (Technischen Hochschule Berlin-Charlottenburg, ныне — Технический университет Берлина) *139*
Технологический институт Карлсруэ (Karlsruher Institut für Technologie) *459*
Тилтман, Джон (John Hessell Tiltman, 1894–1982) *171*
Тильдум, Мортен (Morten Tyldum, род. в 1967) *167*
Тимофеев, Борис Борисович (1915–2002) *286*
Тимощенко, Геннадий Анатольевич (род. в 1949) *327*
Тинсли, Марион (Marion Franklin Tinsley, 1927–1995) *229, 241, 245, 246, 248–255*
Тишбирек, Рай (Raj Tischbierek, род. в 1962) *311*
Томпсон
– Кен (Kenneth Lane Thompson, род. в 1943) *217–219, 268, 292, 317, 324, 326, 351*
– Эд (Ed Thompson) *244*
Томсон, Джеймс (James Thomson, 1822–1892) *125*
Топалов, Весели́н Александров (род. в 1975) *334*
Торндайк
– Алан (Alan Stewart Thorndike, 1946–2018) *66*
– Эдвард (Edward Lee Thorndike, 1874–1949) *439, 440, 469*
Торрес-и-Кеведо
– Гонзало (Gonzalo Torres-Quevedo y Polanco, 1889–1965) *264, 265*
– Леонардо (Leonardo Torres y Quevedo, 1852–1936) *264–266*
Тоуни, Джерельд (Gereld Leon Tawney, 1914–1992) *195*
Траскотт, Том (Thomas Robert "Tom" Truscott, род. в 1953) *240, 241*
Трекслер, Ричард (Richard R. Trexler, 1906–1995) *163*
Трелоар, Норман (Norman Treloar) *242, 246, 247*
трёхфишечная мельница, игра (Three men's morris) *201*
Троицкий, Алексей Алексеевич (1866–1942) *219*
Троубридж, Уильям (William P. Trowbridge, 1828–1892) *111*
Трумэн, Гарри (Harry S. Truman, 1884–1972) *196, 197*
Тунец, шифровальная машина (Tunny) *172*
Тьюки, Джон (John Wilder Tukey, 1915–2000) *473*
Тьюрин, Уильям (William de Turin) *154*
Тьюринг, Алан (Alan Mathison Turing, 1912–1954) *15, 22–25, 27, 28, 150, 154–158, 167, 169, 175–177, 231, 267–269, 271–273, 294, 342, 345, 415, 436–438, 442, 449, 468*
тьюринг-полнота, полнота по Тьюрингу [Turing completeness] *149, 150, 157–159, 164, 177, 433*
тьюринг-эквивалентность *157*
Тьюрочемп, шахматная программа (Turochamp) *267, 268, 271*
Тюбингенский университет (Eberhard Karls Universität Tübingen) *73, 74*

У

Уайли, Шон (Shaun Wylie, 1913–2009) *271*
Уайтхед, Альфред (Alfred North Whitehead, 1861–1947) *407, 414, 480*
Уивер, Уоррен (Warren Weaver, 1894–1978) *413*
Уивинг, Хьюго (Hugo Wallace Weaving, род. в 1960) *17*
Уидроу, Бернард (Bernard Widrow, род. в 1929) *456–458, 477, 487–489*
Уиллис, Роберт (Robert Willis, 1800–1875) *262*
Уилсон, Артур (Arthur Knyvet Wilson, 1842–1921) *129, 130*
Уильямс, Леонард (Leonard Worcester Williams, 1875–1912) *391*
Уильямсон, Джозеф (Joseph Williamson) *63*
Уитмор, Джорджина (Georgina Whitmore, 1792–1827) *80*
ультраслабое решение [ultra-weak solution] *222*
Унгар, Джордж (Georges Ungar, 1906–1977) *470*
Университет
– Альберты (University of Alberta) *227, 310*
– Вашингтона в Сент-Луисе (Washington University in St. Louis, WUSTL) *384*
– Гронингена (Rijksuniversiteit Groningen) *388*
– Гумбольдта (Humboldt-Universität zu Berlin) *296*
– Дьюка (Duke University) *292*
– Дэлхаузи (Dalhousie University) *401*
– Женевы (Université de Genève) *478*

– Йены (Герцогский Саксонский университет, Großherzogliche Herzoglich-Sächsische Gesamtuniversität, ныне — Йенский университет имени Фридриха Шиллера) *271, 369*
– Карнеги — Меллона (Carnegie Mellon University) *304, 307*
– Кейо (慶應義塾大学) *385*
– Кентербери (University of Canterbury) *231*
– Колорадо в Денвере (University of Colorado, Denver) *302*
– Миннесоты (University of Minnesota) *259*
– Ньюкасла (Newcastle University) *177*

Университетский колледж
– Ливерпуля (ныне — Ливерпульский университет, University of Liverpool) *362*
– Лондона (University College London, UCL) *66*

Унцикер, Вольфганг (Wolfgang Unzicker, 1925–2006) *311*

Уокер
– Пол (Paul Walker) *207*
– Фрэнсис (Francis Amasa Walker, 1840–1897) *112*

Уолл, Патрик (Patrick David “Pat” Wall, 1925–2001) *427*

Уолтер, Грей (William Grey Walter, 1910–1977) *448, 449*

Уорн, Фэйт (Faith Warn) *56*

Уорнер, Джек (Jack Leonard Warner, 1892–1978) *424*

Уотсон-старший, Томас (Thomas John Watson Sr., 1874–1956) *145*

Управление по научной и технологической политике, организация (Office of Science and Technology Policy, OSTP) *400*

уравнение Лапласа *160, 161*

уровень постоянного потенциала (steady potential, DC-potential) *362*

Усков, Анатолий Васильевич (1938–2020) *285, 288*

Успенский, Яков Викторович (1883–1947) *276*

Уэбстер, Брюс (Bruce F. Webster, род. в 1953) *346*

Уэвелл, Уильям (William Whewell, 1794–1866) *101*

Уэлчман, Гордон (William Gordon Welchman, 1906–1985) *169, 170*

Уэнтворт, Эдвард Ноэль (Edward Noel, 1st Viscount Wentworth, 1715–1774) *101*

Уэскофф, Марлин (Marlyn Wescoff, 1922–2008) *165*

Ф

Файст, Матиас (Mathias Feist, род. в 1961) *268, 271, 316*

Фалькон, Жан-Батист (Jean-Baptiste Falcon, 1690?–?) *95*

Фано, Роберт (Roberto Mario “Robert” Fano, 1917–2016) *419*

фанорона, игра *228*

Фарли, Бельмонт (Belmont Greenlee Farley, 1920–2008) *449–451*

Фарр, Уильям (William Farr, 1807–1883) *91*

Фейгенбаум, Эдвард (Edward Albert Feigenbaum, род. в 1936) *239*

Фейнман, Ричард (Richard Phillips Feynman, 1918–1988) *137, 399*

Фельдман, Джулиан (Julian Feldman) *239*

Ферворн, Макс (Max Verworn, 1863–1921) *382, 385, 387*

Ферми, Энрико (Enrico Fermi, 1901–1954) *212*

Ферье, Дэвид (David Ferrier, 1843–1928) *365*

Фик, Адольф (Adolf Eugen Fick, 1829–1901) *373*

Фихте, Иоганн Готлиб (Johann Gottlieb Fichte, 1762–1814) *474*

Фишер, Бобби (Robert James “Bobby” Fischer, 1943–2008) *328*

Фишлер, Мартин (Martin A. Fischler) *476*

Фландерс, Ральф (Ralph Edward Flanders, 1880–1970) *451*

Флауэрс, Томас (Thomas Harold Flowers, 1905–1998) *159, 174, 177*

Флейшл фон Марксов, Эрнст (Ernst von Fleischl-Marxow, 1846–1891) *362, 365*

Флинт, Чарльз (Charles Ranlett Flint, 1850–1934) *121*

Флоридский университет (University of Florida) *160*

Флорио, Чинция (Cinzia Florio) *49*

фонема *33*

фоноперцептрон *452, 467, 489*

Форбс, Александр (Alexander Forbes, 1882–1965) *383, 384, 387*

Форд, Ганнибал (Hannibal Choate Ford, 1877–1955) *135*

Форель, Август-Анри (Auguste-Henri Forel, 1848–1931) *363*

Форман, Филипп (Phillip Forman, 1895–1978) *153*

Фортман, Ричард (Richard Fortman, 1915–2008) *241*

фоторецептор *398*

Фрайтаг-Лорингофф, Бруно фон (Bruno von Freytag-Löringhoff, 1912–1996) *74*

Французский институт антропологии (l’Institut Français d’Anthropologie, IFA) *379*

Фреге, Готлоб (Friedrich Ludwig Gottlob Frege, 1848–1925) *142*

Фрейд, Зигмунд (Sigmund Freud, 1856–1939) *365*

Фремонт-Смит, Фрэнк (Frank Fremont-Smith, 1895–1974) *421*

Фридель, Фредерик (Frederic Alois Friedel, род. в 1945) *268, 311, 316–318, 333*

Фрит, Тони (Tony Freeth) *65–68*

Фрич, Густав (Gustav Theodor Fritsch, 1838–1927) *365*

Фрэнк, Ларри (Lawrence “Larry” Kelso Frank, 1890–1968) *421*
Фуко, Жан (Jean Bernard Léon Foucault, 1819–1868) *135*
функция поиска (retrieval function) *271, 458*
Фурье, Жозеф (Jean-Baptiste Joseph Fourier, 1768–1830) *80*
Футер, Арон Л. (род. в 1947) *216, 217*
Фьердингстад, Эльсе (Else J. Fjerdingstad) *470*

X

Хайатт, Роберт (Robert Hyatt, род. в 1948) *303, 322, 329*
Хакинг, Ян МакДугалл (Ian MacDougall Hacking, род. в 1936) *110*
Хаксли
– Джулиан (Julian Sorell Huxley, 1887–1975) *391*
– Олдос (Aldous Huxley, 1894–1963) *391*
– Эндрю (Andrew Fielding Huxley, 1917–2012) *390–392, 394, 395, 412*
Халифман, Александр Валерьевич (род. в 1966) *334*
Халмош, Пол (Paul Richard Halmos, Halmos Pál, 1916–2006) *210*
Хаммер, Франц (Franz Hammer, 1898–1969) *73, 74*
Хан, Ханс (Hans Hahn, 1878–1934) *152, 153*
Ханнум, Линн (Lynn Alborg Hannum, 1915–1988) *160, 161*
Хант, Уильям (William Chamberlin Hunt, 1856–1929) *116, 117*
Хардинг, Эдвард (Edward West Harding, 1877–1934) *128*
Харрис, Эрнест Ллойд (Ernest Lloyd Harris, 1870–1946) *451*
Харсаньи, Джон (Harsányi János Károly, 1920–2000) *210*
Харт, Питер (Peter E. Hart, род. в 1941) *463*
Харьковский университет (ныне — Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина) *366*
Хаф, Джордж (George Washington Hough, 1836–1909) *90*
Хебб, Дональд (Donald Olding Hebb, 1904–1985) *438–441, 450*
Хейн-старший, Пит (Piet Pieterszoon Hein, 1577–1629) *222*
Хейн, Пит (Piet Hein, 1905–1996) *222, 223*
Хеллман, Уолтер (Walter Oskar Fredrik Hellman, 1916–1975) *240*
Хенкин, Виктор Львович (1923–2010) *288*
хеш-таблица *243, 337, 346*
хеширование *239*
Хилл
– Арчибальд (Archibald Vivian Hill, 1886–1977) *413*
– Джеффри (Geoffrey W. Hill, 1928–1982) *231*
Хоан, Джо (Arthur Joseph “Joe” Hoane Jr., род. в 1962) *311*
Хогланд, Джон (John Haugeland, 1945–2010) *294*
Ходжес, Эндрю (Andrew Hodges, род. в 1949) *176, 177*
Ходжкин, Алан (Alan Lloyd Hodgkin, 1914–1998) *391, 392, 394, 395*
Хокинг, Стивен (Stephen William Hawking, 1942–2018) *11*
Холиоук, Кит (Keith James Holyoak, род. в 1950) *475*
Холлерит, Герман (Herman Hollerith, 1860–1929) *111, 113, 114, 116–122, 138, 146, 149, 150*
Хоппер, Грейс (Grace Brewster Murray Hopper, 1906–1992) *147*
Хорвег, Ян (Jan Leendert Hoorweg, 1841–1919, иногда неточно передаётся как Гоорвег) *372–375, 413*
Хорстманн, Хайнц (Heinz Horstmann) *401*
Хоув, Джон Айленд (John Ireland Howe, 1793–1886) *85*
Хофф, Тед (Marcian Edward “Ted” Hoff Jr., род. в 1937) *456, 457*
хронаксия *377–379*
Хупер, Чарльз (Charles Alfred Hooper, 1825–1900) *263*
Хьюбел, Дэвид (David Hunter Hubel, 1926–2013) *466*

Ц

Целикас, Агамемнон (Αγαμέμνων Τσελίκας) *65*
центральная нервная система *378, 390*
Цермело, Эрнст (Ernst Friedrich Ferdinand Zermelo, 1871–1953) *205–209, 214*
Цзюнь, Се (謝軍, Xiè Jūn, род. в 1970) *313*
циклометр *168*
циферблат Виккерса *127, 131*
Цицерон, Марк Туллий (Marcus Tullius Cicero, 106 до н.э. — 43 до н.э.) *60, 62, 67*
Цузе
– Гизела (Gisela Ruth Zuse (Brandes), 1919–2013) *144*
– Конрад (Konrad Zuse, 1910–1995) *106, 138–145, 149, 150, 158, 177, 184, 269, 271, 284*
– Лизелотта (Lieselotte Margarete Hedwig Zuse, 1908–1952) *140*
– Эмиль (Ernst Wilhelm Albert Zuse, 1873–1946) *138*
Цфасман, Михаил Анатольевич (род. в 1954) *301*
Цыбульский, Наполеон (Napoleon Nikodem Cybulski, 1854–1919) *367*
Цэрану, Каталина (Cătălin Țăranu, род. в 1973) *347*

Ч

Чайлдерс, Джерри (Jerry Childers) *255*
чат-бот *216, 261*
Чаффи, Эмори (Emory Leon Chaffee, 1885–1975) *145*
Чейз, Джордж (George Clinton Chase, 1884–1973) *145*
Челеби, Эвлия (османск. اولیا چلبی, тур. Evliya Çelebi, 1611–1682?) *71*
Чемпернаун, Дэвид (David Gawen Champernowne, 1912–2000) *267, 268*
Черри, Колин (Edward Colin Cherry, 1914–1979) *479*
Черуцци, Пол (Paul E. Ceruzzi, род. в 1949) *150*
Чёрч
– Алонзо (Alonzo Church, 1903–1995) *150, 152, 154, 157, 158*
– Джордж (George McDonald Church, род. в 1954) *401*
четыре в ряд, игра *228, 242*
Чжэн, Чжихао (Zhihao Zheng) *402*
Чигорин, Михаил Иванович (1850–1908) *263, 316*
Чикагский университет (University of Chicago) *408, 412, 420, 438*
Чунь, Миянг (Miyoung Chun) *401*

Ш

Шанк, Роджер (Roger Carl Schank, род. в 1946) *472, 474–476*
шахматная программа
– Бернстайна *278*
– Котока — Маккарти *279*
шахматные поддавки, игра *228*
шахматы, игра *9, 17, 79, 190, 191, 199, 201, 202, 206–208, 212, 214–218, 227, 228, 230, 241, 242, 245, 250, 253, 259, 262–264, 267–269, 273, 275, 277, 278, 283, 285, 286, 288–298, 300, 303–310, 312, 313, 316, 318, 323, 327, 329, 330, 332–335, 337, 339, 340, 345, 346, 348–350, 480, 482*
шашечная программа
– Стрейчи *231, 235*
– Сэмюэла *238, 239*
– Шеффера *242, 244, 252*
шашки, игра (чекерс, checkers) *18, 191, 198, 202, 212, 227, 229–242, 245, 246, 248–251, 253–259, 263, 269, 349, 350*
Шваб, Клаус (Klaus Martin Schwab, род. в 1938) *39*
Швальбе, Ульрих (Ulrich Schwalbe) *207*
шванновские клетки *390*
Шейнволд, Альфред (Alfred Sheinwold, 1912–1997) *218*
Шелдон, Харольд (Harold Horton Sheldon, 1893–1964) *411*
Шеннон, Клод (Claude Elwood Shannon, 1916–2001) *269–271, 273, 277, 289, 293, 298, 320, 339, 424, 442, 448*
Шерборнская школа (Sherborne Public School) *155*
Шеррингтон, Чарльз (Charles Scott Sherrington, 1857–1952) *383, 388*
Шеффер
– Генри (Henry Maurice Sheffer, 1882–1964) *436*
– Джонатан (Jonathan Herbert Schaeffer, род. в 1957) *227, 240–242, 244–259, 350*
Шиккард, Вильгельм (Wilhelm Schickard, 1592–1635) *73–75*
Шимбел, Альфонсо (Alfonso Shimbel, 1923–1987) *438*
Шипшенкс, Ричард (Richard Sheepshanks, 1794–1855) *107*
Школа восточных и африканских исследований Лондонского университета (SOAS University of London, School of Oriental and African Studies) *59*
Школа горного дела при Колумбийском колледже (Columbia School of Mines, Columbia College) *111*
Шлибс, Гюнтер (Günter Schliebs) *273*
Шлик, Мориц (Friedrich Albert Moritz Schlick, 1882–1936) *152*
Шлюмберже, Уильям (William Schlumberger, 1800–1838) *262*
Шмитт, Отто (Otto Herbert Schmitt, 1913–1998) *356*
Шорт, Найджел (Nigel David Short, род. в 1965) *309, 314*
Шоу, Клифф (John Clifford “Cliff” Shaw, 1922–1991) *237, 278, 480*
Шрайер, Хельмут (Helmut Schreyer, 1912–1984) *140–142*
Шрёдер
– Эд (Ed Schröder, род. в 1950) *333*
– Эрнст (Friedrich Wilhelm Karl Ernst Schröder, 1841–1902) *142*
Штеблейн, Вильгельм (Wilhelm Stäblein, 1900–1945) *141*
Штейнбух, Карл (Karl W. Steinbuch, 1917–2005) *459*
Штемпфли, Роберт (Robert Stämpfli, 1914–2002) *390*
Штибиц, Джордж (George Robert Stibitz, 1904–1995) *150, 177*
Штильман, Борис Михайлович (род. в 1950) *301, 302*
Штифель
– Михаэль (Michael Stifel, 1487–1567) *69, 70*
– Эдуард (Eduard Ludwig Stiefel, 1909–1978) *144*
Штрохлейн, Томас (Thomas Ströhlein, род. в 1941) *216*
Шульц, Дон (Donald “Don” Schultz, 1936–2020) *275*
Шура-Бура, Михаил Романович (1918–2008) *279, 282, 291*
Шутц, Георг (Per (Pehr) Georg Scheutz, 1785–1873) *89–91, 146*
Шюке, Никола (Nicolas Chuquet, 1445? — ок. 1488) *70*
Шют, Йоахим (Joachim Schüth) *178*

Э

Эванс, Джеймс (James C. Evans) *66*
эвристика пустого хода *337*
эвристические функции *232*
Эдельман, Макс (Max Thomas Edelmann, 1845–1913) *370*
Эдинбургский университет (University of Edinburgh) *475*
Эдисон, Томас (Thomas Alva Edison, 1847–1931) *147*
Эдмондс, Дин (Dean Stockett Edmonds Jr., 1924–2018) *441, 442*
Эдмундс, Майк (Mike (Michael) Edmunds) *65*
Эдриан, Эдгар (Edgar Douglas Adrian, 1889–1977) *246, 381–383, 385, 388, 389, 391, 394*
Эйве, Макс (Machgielis "Max" Euwe, 1901–1981) *295, 296*
Эйкен, Говард (Howard Hathaway Aiken, 1900–1973) *106, 145–149, 284, 421*
Эйнтховен, Виллем (Willem Einthoven, 1860–1927) *370, 383, 384*
Эйнштейн, Альберт (Albert Einstein, 1879–1955) *113, 152*
Экерс, Джон (John Fellows Akers, 1934–2014) *312*
Эккерт, Джон (John Adam Presper "Pres" Eckert Jr., 1919–1995) *159, 163–166, 195, 422*
эклиптика *58, 59, 63*
экспоненциальный вариант модели «интегрировать-и-сработать» [Exponential integrate-and-fire] *391*
электротонический потенциал *392*
электроэнцефалограмма *367, 370, 371, 389*
электроэнцефалография *362, 367*
элемент Лекланше *374*
Элиашвили, Арчил Иванович (1904–1972) *286*
Эло, Арпад (Árpád Élő, 1903–1992) *291*
Элфинстоун, Кейт (George Keith Buller Elphinstone, 1865–1941) *131*
Эльвест, Яан Юханович (род. в 1962) *335*
Эмерсон, Ральф (Ralph Waldo Emerson, 1803–1882) *383*
Эммонс, Скотт (Scott Emmons) *402*
Энгель, Эрнст (Ernst Engel, 1821–1896) *110*
Энергетический институт АН СССР *179, 183*
Энигма, шифровальная машина (от немецкого Änigma — загадка) *167–170, 173*
Эрасистрат (Ἐρασίστρατος, 304 до н.э. — 250 до н.э.) *358*
Эрбран, Жак (Jacques Herbrand, 1908–1931) *151*
Эрдёш, Пал (Paul Erdős, Erdős Pál, 1913–1996) *211*
Эредиа, Марселла де (Marcelle de Hérédia, 1873–1960) *380*
Эриксон, Милтон (Milton Hyland Erickson, 1901–1980) *421*
Эрлангер, Джозеф (Joseph Erlanger, 1874–1965) *379, 384, 388*
Эсхил (Αἰσχύλος, 525 до н.э. — 456 до н.э.) *53*
эффект горизонта *237, 271, 305*
Эшби, Росс (William Ross Ashby, 1903–1972) *436, 442, 443, 445–448*
Эшли, Морис (Maurice Ashley, род. в 1966) *316, 325, 329*

Ю

Юдин, Александр Д. *301*
Юнгханс, Андреас (Andreas Junghanns) *259*
Юри, Гарольд (Harold Clayton Urey, 1893–1981) *197*
Юст, Рафаэль (Rafael Yuste, род. в 1963) *401*
Юсупов, Артур Маякович (род. в 1960) *333*

Я

Ягеллонский университет (Uniwersytet Jagielloński) *362*
Якобсон
– Аллан (Allan L. Jacobson) *470*
– Энн (Ann Jacobson) *470*
Янг, Джон (John Zachary Young, 1907–1997) *391*

A

A16chs, шахматная программа *290*
ABC, компьютер (Atanasoff-Berry Computer, компьютер Атанасова и Берри) *159, 162–164*
ACM, организация (Association for Computing Machinery, Ассоциация вычислительной техники) *217, 310, 312, 314–317, 324*
Acornsoft Go, программа для игры в го *346*
ADALINE, устройство (Adaptive Linear Neuron, или позднее Adaptive Linear Element, адаптивный линейный нейрон / адаптивный линейный элемент) *456, 458, 459, 488, 489*
AEG-Telefunken TR4, компьютер *216*
AGI (artificial general intelligence, общий/сильный/универсальный искусственный интеллект) *20, 27*
AI (artificial intelligence, искусственный интеллект, ИИ) *16, 17, 20, 21, 27, 29, 39, 216, 285, 337, 402, 480*
AlexNet, сеть *4*
AlphaZero, программа для игры в настольные игры *18*
Amazon, компания *259*
Autocode, программа *267*

B

Beal, шахматная программа *290*
Belle, шахматная программа *217, 292*
BKG, программа для игры в нарды *305, 306*
Blue Brain Project, проект *405*
BRAIN Initiative, исследовательская программа (Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies, Исследование мозга через продвижение инновационных нейротехнологий) *399, 400, 405*

C

CeBIT, выставка *311*
CHAOS, шахматная программа *217*
Checker Hustler, шашечная программа *245, 247*
Checker-Mate, шашечная программа *246, 247*
Checkers!, шашечная программа *247*
Checkers Experimental, шашечная программа *247, 248*
Chess, шахматная программа *290–292*
Chess Computer Sapiens, шахматная программа («Разумный шахматный компьютер») *302*
ChessBase, шахматная программа *268, 316, 335*
ChessSystem R30, шахматная программа *313*
China Brain Project, проект *405*
Chinook, шашечная программа *242, 244–255*
ChipTest, ChipTest-M, шахматная программа *307, 337*
Civilization, игра *349*
CLOP, утилита (Confident Local OPtimization, уверенная локальная оптимизация) *350*
CMOS, устройство (Complementary metal-oxide-semiconductor, комплементарная структура металл — оксид — полупроводник) *307*
Colossus, шашечная программа *246, 252*
Colossus Mark I, компьютер *149, 159, 174, 175, 177, 178*
CORA, устройство (COnditioned Reflex Analog, аналог условных рефлексов) *449*
Crafty, шашечная программа *303*
Cray Blitz, шахматная программа *217, 303, 310, 312, 329*
Crazy Bishop, шахматная программа *350*
Crazy Stone, программа для игры в го *347*
CSIR Mk1, компьютер *231*

D

DARPA, организация (Defense Advanced Research Projects Agency, Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США) *309, 489*
DEC PDP-10, компьютер *305*
Deep Blue, шахматная программа *9, 248, 291, 303, 304, 311–326, 328–335, 337, 339–341*
Deep Thought, шахматная программа (произносится близко к «Дип Сот», переводится как «Великий Думатель» или «Глубокомысленный», версии Deep Thought II, Deep Blue Prototype, Nordic Deep Blue) *248, 303, 307–311, 313, 314, 329, 337, 341*
Dota, игра *349*

E

Edison, компьютер *228*
EDVAC, компьютер (Electronic Discrete Variable Automatic Computer) *422*
El Ajedrecista, шахматный компьютер (Шахматный игрок) *195, 264, 265*
ENIAC, компьютер (Electronic Numerical Integrator and Computer, электронный численный интегратор и компьютер) *149, 159, 163–166, 179, 182, 422, 423, 479*
ETH-Zürich, институт (Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich) *144*
EyeWire, онлайн-игра *397–399*

F

Ferranti Mark 1, компьютер *232*
FORTRAN, язык программирования *274*
FPGA, устройство (Field-Programmable Gate Array, Программируемая пользователем вентильная матрица) *307, 343*
Frantz, шахматная программа *290*
Freedom, шахматная программа *290*
Fritz, шахматная программа *242, 313, 314, 316, 332, 334, 335, 341*

G

Go Intellect, программа для игры в го *347*
GOFAI, подход (Good Old-Fashioned Artificial Intelligence, Старый добрый искусственный интеллект) *294, 336*
Google, компания *242, 402, 403*
GPU, устройство (Graphics Processing Unit, графический процессор, в просторечии — видеокарта) *342, 343*

H

HAL 9000, компьютер *318, 479*
Harvard Mark I, компьютер *106, 145, 148–150, 158, 164, 177*
Heroes of Might and Magic, игра *349*
Hiarcs, шахматная программа *335*
HiTech, шахматная программа *305, 306*
Human Brain Project, проект *405*
Hydra, шахматная программа *334*

I

IBM, компания *121, 145, 146, 148, 161, 220, 230, 238–240, 247, 274–279, 288, 304, 305, 310–313, 315, 317, 320–322, 324, 325, 330, 332, 333, 341, 450, 455, 479*
IBM 360, компьютер *288*
IBM 701, компьютер *230, 239*
IBM 704, компьютер *230, 278, 450, 455*
IBM RS/6000, компьютер *247, 311*
ICGA, организация (International Computer Games Association, Международная ассоциация компьютерных игр) *216, 242*
ICL 4/70, мейнфрейм *288*
IPL, язык программирования (Information Processing Language, язык обработки информации) *278*

J

Junior, шахматная программа *311, 334*

K

KGS Go, сервер *347*
KIM-1, компьютер *346*
Komodo, шахматная программа *335*

L

Lernmatrix, алгоритм и нейрокомпьютер *459*

M

MacHack, шахматная программа *217*
MADALINE, модель *458, 488*
Manchester Mark 1, MADM, компьютер (Manchester Automatic Digital Machine, Манчестерская автоматическая цифровая машина), MADAM *231*
MANIAC I, компьютер (Mathematical Analyzer, Numerical Integrator, and Computer, Математический анализатор, счётчик, интегратор и компьютер) *278*
Mark I Perceptron, нейрокомпьютер *455*
Mark II, компьютер *148, 175*
Marvin, программа для игры в авари *255*
Master, шахматная программа *290*
MChess, шахматная программа *312*
Mephisto, шахматная программа *248*
MINOS II, модель *461–463*
MIPS MI20, компьютер *247*
MNIST, датасет (Modified National Institute of Standards and Technology database, Модифицированная база данных Национального института стандартов и технологий) *453*
MogoTW, программа для игры в го *347*
Moor, программа для игры в «отелло» (реверси) *350*
Mr. Turk, шахматная программа *259*

N

Nemesis, программа для игры в го *346*
Nona, шахматная программа *316*
NSS, CP, CP-1, шахматная программа *278*
Nvidia, компания *342, 343*

O

ONR, организация (Office of Naval Research, Управление военно-морских исследований) *489*
OpenWorm, проект *406*
Ostrich, шахматная программа *290, 291, 315*
OXO, программа для игры в крестики-нолики *203*

P

Papa, шахматная программа *290*
PARA, проект (The Perceptron: A Perceiving and Recognizing Automaton, Перцептрон: воспринимающий и распознающий автоматон) *452, 453*
PDP-1, компьютер *478*
Phoenix, Sun Phoenix, шахматная программа («Феникс», «Солнечный Феникс») *242*

Q

Quest, шахматная программа *316*

R

RAND Corporation, компания *224, 480, 482*
Raspberry Turk, шахматный робот *259*
Rebel, шахматная программа *333*
Ribbit, шахматная программа *290*
Rybka, шахматная программа *335*

S

Sage Draughts, шашечная программа *247*
self-supervised learning (самообучение, самоконтролируемое обучение, обучение в режиме «сам себе учитель») *32*
seq2seq, задача и соответствующий класс моделей *37*
SETI, проект (Search for Extraterrestrial Intelligence, Поиск внеземного разума) *468*
SGI 4D/480, компьютер *250*
Shredder, шахматная программа *311*
SmarThink, шахматная программа *331, 332*
SNAC, подход (Smoothness, Nonlinearity, and Application Coefficients, Гладкость, нелинейность и коэффициенты применения) *305*
SNARC, устройство (Stochastic Neural Analog Reinforcement Calculator, стохастический нейронный аналоговый калькулятор с подкреплением) *441, 442, 484*
Socrates Exp, шахматная программа *312*
Softwari, программа для игры в авари *255*
SOMA, алгоритм для игры в шахматы (Smith One-Move Analyzer, Одноходовый анализатор Смита) *271*
SOMAC, гибрид SOMA-Machiavelli, алгоритм для игры в шахматы *272*
SRI, институт (Стэнфордский исследовательский институт в Менло-парке) *461, 463, 476, 489*
StarCraft, игра *349*
Stockfis , шахматная программа *332, 341, 351*
SZ40, шифровальная машина *170*
SZ42, шифровальная машина *170, 178*

T

Tech 2, шахматная программа *290*
Tell, шахматная программа *290*
The Turk
– Ингви Бьёрнссона и Андреаса Юнгханса, шахматная программа *259*
– Якупа Ипека, шахматная программа *259*
Tobermory, модель *467*

W

Wally, шахматная программа *346*

X

X3D Fritz, шахматная программа *334*

Z

Z1, компьютер *138, 140–143, 149, 158*
Z2, компьютер *142, 143, 158*
Z3, компьютер *143, 149, 158*
Z4, компьютер *140, 143*
Zen, программа для игры в го *347*

Источники

1. https://www.sciencedaily.com/terms/artificial_intelligence.htm
2. Copeland J. (2003). Moor, James, ed., “The Turing Test”, The Turing Test: The Elusive Standard of Artificial Intelligence, Springer.
3. Russell S. J., Norvig P. (2016). Artificial Intelligence: A Modern Approach. Pearson // https://books.google.ru/books?id=XS9CjwEACAAJ
4. Bellman R. E. (1978). An Introduction to Artificial Intelligence: Can Computers Think? Boyd & Fraser Publishing Company.
5. Winston P. H. (1992). Artificial Intelligence (Third edition). Addison-Wesley.
6. Kurzweil R. (1990). The Age of Intelligent Machines. MIT Press.
7. Bellman R. E. (1978). An Introduction to Artificial Intelligence: Can Computers Think? Boyd & Fraser Publishing Company.
8. Poole D., Mackworth A., Goebel R. (1998). Computational Intelligence: A Logical Approach. New York: Oxford University Press.
9. Russell S. J., Norvig P. (2016). Artificial Intelligence: A Modern Approach. Pearson // https://books.google.ru/books?id=XS9CjwEACAAJ
10. McCorduck P. (2004). Machines who think: a personal inquiry into the history and prospects of artificial intelligence. A. K. Peters // https://books.google.ru/books?id=aH9QAAAAMAAJ
11. Kahn J. (2002). It’s Alive! / Wired, 03.01.2002 // https://www.wired.com/2002/03/everywhere/
12. Hofstadter D. R. (2000). Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid. Penguin // https://books.google.ru/books?id=grzEQgAACAAJ
13. Tesler L. CV: Adages & Coinages // http://www.nomodes.com/Larry_Tesler_Consulting/Adages_and_Coinages.html
14. Searle J. (1980). Minds, Brains and Programs / Behavioral and Brain Sciences, 3 (3): 417–457 // https://doi.org/10.1017/S0140525X00005756
15. Kurzweil R. (2005). The Singularity is near: when humans transcend biology. Viking Press // https://books.google.ru/books?id=9FtnppNpsT4C
16. Gubrud M. A. (1997). Nanotechnology and International Security // https://web.archive.org/web/20190430021737/https://foresight.org/Conferences/MNT05/Papers/Gubrud/
17. Seligman J. (2020). artificial Intelligence / Machine Learning In Marketing. Lulu.com // https://books.google.ru/books?id=l6zRDwAAQBAJ
18. Айер А. Д. (2010). Язык, истина и логика / Пер. с англ. В. А. Суровцева, Н. А. Тарабанова. Под общей ред. В. А. Суровцева. — М: «Канон+» РООИ «Реабилитация».
19. Diderot D. (2007). Pensees Philosophiques, Addition aux Pensees Philosophiques[Flammarion], p. 68.
20. Тьюринг А. (1960). Может ли машина мыслить? С приложением статьи Дж. фон Неймана «Общая и логическая теория автоматов» / Пер. с англ. Ю. А. Данилова, редакция и предисловие проф. С. А. Яновской. — М.: Государственное издательство физико-математической литературы.
21. Evans R., Collins H. M. (2010). Interactional Expertise and the Imitation Game / Gorman M. E. (2010). Trading Zones and Interactional Expertise: Creating New Kinds of Collaboration. Cambridge: MIT Press, pp. 53–70.
22. Hollings K. (2013). “There must be something wrong with this, Sally…” Faults, Lapses and Imperfections in the Sex Lives of Machines / Leonardo Electronic Almanac, Vol. 19, Iss. 4 // https://www.leonardo.info/journal-issue/leonardo-electronic-almanac/19/4
23. Pruchnic J. (2013). Rhetoric and Ethics in the Cybernetic Age: The Transhuman Condition. Routledge // https://books.google.ru/books?id=-sUttAAAAQBAJ
24. Turing A. (1952). Can Automatic Calculating Machines be Said to Think? / Copeland J. B. (2004). The Essential Turing: The ideas that gave birth to the computer age. Clarendon Press // https://books.google.ru/books?id=VlC5MkVIwqkC
25. Sterrett S. G. (2000). Turing’s Two Test of Intelligence / Minds and Machines, Vol. 10, Iss. 4, p. 541 // https://doi.org/10.1023/A:1011242120015
26. Кокшотт У. П., Микаэльсон Г., Коттрел А. (2017). Бёттке, синтаксис и тест Тьюринга / Пер. с англ.

Горлова А. В., Маркова С. С. // https://22century.ru/popular-science-publications/boettke-syntax-and-the-turing-test
27. Landau L. J. (1997). Penrose's Philosophical Error / Landau L. J., Taylor J. G. (1998). Concepts for Neural Networks. Perspectives in Neural Computing. Springer, London // https://doi.org/10.1007/978–1–4471–3427–5_7
28. The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds and the Laws of Physic, Oxford University Press.
29. Shieber S. M. (1994). Lessons from a Restricted Turing Test / Communications of the ACM, Vol. 37, Iss. 6, pp. 70–78 // https://doi.org/10.1145/175208.175217
30. Russell S. J., Norvig P. (2016). Artificial Intelligence: A Modern Approach. Pearson // https://books.google.ru/books?id=XS9CjwEACAAJ
31. Mallery J. C. (1988). Thinking About Foreign Policy: Finding an Appropriate Role for Artificially Intelligent Computers / The 1988 Annual Meeting of the International Studies Association., St. Louis, MO.
32. McCarthy J. (1996). "The Philosophy of Artificial Intelligence", What has AI in Common with Philosophy?
33. Луис фон Ан. Массовое онлайн-сотрудничество // Конференция TED, 2011.
34. См. патент Method and system for discriminating a human action from a computerized action. 2004–03–01 // https://patents.google.com/patent/US20050114705A1/en
35. Samuel A. (1959). Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers / IBM Journal of Research and Development, Vol. 3, Iss. 3, pp. 210–229 // https://doi.org/10.1147/rd.33.0210
36. Воронцов К. В. Математические методы обучения по прецедентам (теория обучения машин) // http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6d/Voron-ML-1.pdf
37. Goled S. (2021). Self-Supervised Learning Vs Semi-Supervised Learning: How They Differ / Analytics India Magazine, May 7, 2021 // https://analyticsindiamag.com/self-supervised-learning-vs-semi-supervised-learning-how-they-differ/
38. Воронцов К. В. Математические методы обучения по прецедентам (теория обучения машин) // http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6d/Voron-ML-1.pdf
39. The measurement of man // http://www.galtoninstitute.org.uk/sir-francis-galton/psychology-statistics-criminology/
40. Galton F. (1886). Regression Towards Mediocrity in Hereditary Stature. The Journal of the Anthropological Institute of Great Britain and Ireland, Vol. 15, pp. 246–263 // http://www.jstor.org/stable/2841583
41. Воронцов К. В. Математические методы обучения по прецедентам (теория обучения машин) // http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6d/Voron-ML-1.pdf
42. Luong M.-T., Brevdo E., Zhao R. (2017). Neural Machine Translation (seq2seq) Tutorial // https://web.archive.org/web/20171123080802/https://www.tensorflow.org/tutorials/seq2seq
43. См., напр.: Xing Z., Pei J., Keogh E. (2010). A Brief Survey on Sequence Classification / SIGKDD Explorations, Vol. 12, pp. 40–48 // https://doi.org/10.1145/1882471.1882478
44. См., напр.: Gsponer S., Smyth B., Ifrim G. (2017). Efficient sequence regression by learning linear models in all-subsequence space / Ceci M., Hollmén J., Todorovski L., Vens C., Džeroski S. (2017). Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. Springer International Publishing.
45. Roweis S. T., Saul L. K. (2000). Nonlinear Dimensionality Reduction by Locally Linear Embedding / Science, Vol. 290, Iss. 5500, pp. 2323–2326 // https://doi.org/10.1126/science.290.5500.2323
46. Bishop C. M., Lasserre J. (2007). Generative or discriminative? Getting the best of both worlds / Bayesian Statistics, Vol. 8, Iss. 3, p. 24.
47. Schwab K. (2017). The Fourth Industrial Revolution. World Economic Forum // https://www.google.ru/books?id=ST_FDAAAQBAJ
48. Шваб К. (2016). Четвёртая промышленная революция. Издательство «Э» // https://books.google.com/books?id=rTRnDQAAQBAJ
49. Boyer C. B., Merzbach U. C. (2011). A History of Mathematics. John Wiley & Sons // https://www.google.ru/books?id=bR9HAAAAQBAJ
50. Википедия // https://ru.wikipedia.org/wiki/Абак (версия от 11.03.2018).
51. См., напр.: Большой энциклопедический словарь (2002) / 2-е изд., перераб. и доп., с ил. // https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc3p/44770
52. Donnegan J. Patton R. B. (1838). A New Greek and English Lexicon: Principally on the Plan of the Greek and German Lexicon of Schneider: the Words Alphabetically Arranged. Hilliard, Gray & Company.
53. Шанский Н. М., Боброва Т. А. (2004) Школьный этимологический словарь русского языка. Происхождение слов. — М.: Дрофа.
54. A Greek-English lexicon to the New Testament by Greenfield, William, 1799–1831; Green, Thom-

as Sheldon, 1803 or 1804–1876; Hastings H. L. (Horace Lorenzo), 1831–1899; Stearns, Wallace N. (Wallace Nelson), 1866-; Thayer, Joseph Henry, 1828–1901 // https://www.gutenberg.org/files/40935/40935-h/40935-h.htm
55. Михельсон А. Д. (1865) Объяснение 25 000 иностранных слов, вошедших в употребление в русский язык, с означением их корней.
56. A Dictionary of Greek and Roman Antiquities (1890) / William Smith, LLD, William Wayte, G. E. Marindin, Ed // http://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?doc=Perseus%3Atext%3A1999.04.0063%3Aalphabetic+letter%3DA%3Aentry+group%3D1%3Aentry%3Dabacus-cn
57. Online etymology dictionary © 2001–2018 Douglas Harper. All rights reserved // https://www.etymonline.com/word/abacus
58. Huehnergard J. (2011). “Appendix of Semitic Roots, under the root ʾbq.”. American Heritage Dictionary of the English Language (5th ed.). Houghton Mifflin Harcourt Trade.
59. Online etymology dictionary © 2001–2018 Douglas Harper. All rights reserved // https://www.etymonline.com/word/abacus
60. Robertson J. (2019). Robertson’s Words for a Modern Age: A Dictionary of English Vocabulary Words Derived Primarily from Latin and Greek Sources, Presented Individually and in Family Units // https://wordinfo.info/
61. Ifrah G. (2001). The Universal History of Computing: From the Abacus to the Quantum Computer. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., p. 11.
62. Ifrah G. (2000). The Universal History of Numbers: From prehistory to the invention of the computer. John Wiley and Sons. Translated from the French by David Bellos, E. F. Harding, Sophie Wood and Ian Monk.
63. Macey S. L. (1989). The Dynamics of Progress: Time, Method, and Measure, Atlanta, Georgia: University of Georgia Press, p. 92.
64. Ndimele O., Chan S. (2016). The Numeral Systems of Nigerian Languages. Oxford: African Books Collective. Retrieved June 21, 2018, from Project MUSE database.
65. Francis W. (1988). Gazetteer of South India. Mittal Publ.
66. Caughley R. C. (1989). Chepang — a Sino-Tibetan language with a duodecimal numeral base?, in D. Bradley et al. (eds.).
67. de Buffon G. L. L., de Lacépède B. G. É. (1839). Oeuvres complètes de Buffon. Rapet et cie.
68. Foundation and First Generation // http://www.dozenal.org/drupal/content/foundation-and-first-generation.html
69. The Dozenal Society of Great Britain // http://www.dozenalsociety.org.uk/
70. Karttunen F. E. (1992). An Analytical Dictionary of Nahuatl. University of Oklahoma Press // https://books.google.ru/books?id=s4LURGToh2AC
71. Kane N. (2016). Maya Math Simplified. Spangenhelm Publishing // https://books.google.ru/books?id=8vN6DQAAQBAJ
72. Ancient Aztec ‘Computer’ beats electronic brains / Radford Journal Weekly (November 3, 1977) // https://newspaperarchive.com/radford-journal-weekly-nov-03–1977-p-2/
73. Гуаман Пома де Айяла Ф. (2011). Первая новая хроника и доброе правление (доколумбовый период) / Пер. со староисп. В. А. Кузьмищева; отв. ред. Н. Ю. Кудеярова. — М.: Памятники исторической мысли // http://www.piminfo.ru/catfile/bbook_Pdf_small_275.pdf
74. Florio C. Risposta aperta a Subhash Kak sulla decifrazione della yupana di Guaman Poma // https://www.academia.edu/6343696/Risposta_aperta_a_Subhash_Kak_sulla_yupana_di_Guaman_Poma_de_Ayala
75. Volkov A. K. (1994). Large Numbers and Counting Rods / Extrême-Orient, Extrême-Occident, 1994, n°16. Sous les nombres, le monde: Matériaux pour l’histoire culturelle du nombre en Chine ancienne, pp. 71–92 // https://doi.org/10.3406/oroc.1994.991
76. Igarashi Y., Altman T., Funada M., Kamiyama B. (2014). Computing: A Historical and Technical Perspective. CRC Press // https://books.google.ru/books?id=eabNBQAAQBAJ
77. Moon P. H. (1971). The abacus: its history, its design, its possibilities in the modern world. Gordon and Breach Science Publishers // https://books.google.ru/books?id=G1LxAAAAMAAJ
78. Wagner R. G., Wang B. (2003). A Chinese Reading of the Daodejing: Wang Bi’s Commentary on the Laozi with Critical Text and Translation. State University of New York Press // https://books.google.ru/books?id=bUZNAAAAQBAJ
79. Gullberg J., Hilton P., Gullberg P. (1997). Mathematics: From the Birth of Numbers. W. W. Norton // https://books.google.ru/books?id=E09fBi9StpQC
80. Васубандху (2006). Энциклопедия буддийской канонической философии (Абхидхармакоша) / Составление, перевод, комментарии, исследования Е. П. Островской, В. И. Рудого. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та. С. 74 // http://abhidharma.ru/A/Guru%20Mahasiddhi/Content/Vasubandhu/Abhidharmakosha%20O.R.%20V–VI.pdf
81. Витсен Н. (2010). Северная и Восточная Тартария: в 3 т. — Амстердам: Pegasus. 624;

608; 584 с. // https://www.pegasusboek.nl/severnaia-i-vostotsnaja-tartarija.html
82. Миллер Г. Ф. (1937). История Сибири. — М.: Издательство АН СССР. 637 с., 2 карты // https://www.runivers.ru/upload/iblock/2f8/miller%201.pdf
83. Карамзин Н. М. История государства Российского // http://www.kulichki.com/inkwell/text/special/history/karamzin/kar09_06.htm
84. Цепков А. И. (сост.). Сочинения Григория Скибинского. Переписная книга домовой казны патриарха Никона. — Рязань: Александрия. С. 463 // https://mirlib.ru/knigi/history/212098-sochineniya-grigoriya-skibinskogo-perepisnaya-kniga-domovoy-kazny-patriarha-nikona.html
85. Спасский И. Г. (1952). Происхождение и история русских счётов // Историко-математические исследования. — М.: ГИТТЛ. № 5. С. 269–420 // http://pyrkov-professor.ru/default.aspx-?tabid=195&ArticleId=43
86. The History Of Herodotus. Vol. 1 (of 2). Translator: G. C. Macaulay // https://www.gutenberg.org/files/2707/2707-h/2707-h.htm
87. Smith D. E. (1958). History of Mathematics. Dover Books on Mathematics. 2: Special Topics of Elementary Mathematics. Courier Dover Publications.
88. Smith D. E. (1958). History of Mathematics. Dover Books on Mathematics. 2: Special Topics of Elementary Mathematics. Courier Dover Publications.
89. Aeschylus, Agamemnon (Greek) (ed. Herbert Weir Smyth, Ph. D.) // http://data.perseus.org/citations/urn: cts: greekLit: tlg0085.tlg005.perseus-grc1:538–582
90. Aristophanes. Aristophanes Comoediae, ed. F. W. Hall and W. M. Geldart, vol. 1. F. W. Hall and W. M. Geldart. Oxford. Clarendon Press, Oxford. 1907 // http://data.perseus.org/citations/urn: cts: greekLit: tlg0019.tlg004.perseus-grc1:316–333
91. Aristophanes. Aristophanes Comoediae, ed. F. W. Hall and W. M. Geldart, vol. 1. F. W. Hall and W. M. Geldart. Oxford. Clarendon Press, Oxford. 1907 // http://data.perseus.org/citations/urn: cts: greekLit: tlg0019.tlg004.perseus-grc1:650–695
92. Athenaion Politeia, ed. Kenyon. Oxford. 1920 // http://data.perseus.org/citations/urn: cts: greekLit: tlg0086.tlg003.perseus-eng1:69.1
93. Ifrah G. (2001). The Universal History of Computing: From the Abacus to the Quantum Computer. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.
94. Trendall & Cambitoglou, 1982, p. 495, no. 18/38, pl. 176,1; FR pl. 88 // http://www.perseus.tufts.edu/hopper/artifact?name=Naples+3253&object=vase
95. Pullan J. M. (1968). The History of the Abacus. New York, NY: Frederick A. Praeger, Inc., Publishers.
96. Historiae. Polybius. Theodorus Büttner-Wobst after L. Dindorf. Leipzig. Teubner. 1893 // http://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?doc=urn: cts: greekLit: tlg0543.tlg001.perseus-eng1:5.26
97. Diogenes Laertius, Lives of Eminent Philosophers R. D. Hicks, Ed. (1972) // http://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?doc=urn: cts: greekLit: tlg0004.tlg001.perseus-eng1:1.2
98. Williams M. R. (1997). Baltes, Cheryl, ed. A History of Computing technology (2nd ed.). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press.
99. The sponge divers and the original crew. Return to Antikythera. A project of the Hellenic Ministry of Culture and Sports // http://antikythera.org.gr/history/1900–1901/sponge-divers/
100. Nikoli M., Seiradakis J. H. The first newspaper references to the antikythera shipwreck discoveries // http://academy.edu.gr/Antikythera-Digital-Book-Files/08_Magdalini.pdf
101. Мерчант Д. (2017). Антикитерский механизм: Самое загадочное изобретение Античности. — М.: Альпина нон-фикшн // https://www.google.ru/books?id=KkooDwAAQBAJ
102. Trimmis K. P. (2016). The Forgotten Pioneer: Valerios Stais and his research in Kythera, Antikythera and Thessaly / Bulletin of the History of Archaeology, Vol. 26, Iss. 1 // http://doi.org/10.5334/bha-558
103. Athens, NM Br. 13400 (Sculpture) // http://www.perseus.tufts.edu/hopper/artifact?name=Athens,+NM+Br.+13400&object=sculpture
104. Trimmis K. P. (2016). The Forgotten Pioneer: Valerios Stais and his research in Kythera, Antikythera and Thessaly / Bulletin of the History of Archaeology, Vol. 26, Iss. 1 // http://doi.org/10.5334/bha-558
105. Hederich B. (1827). Novum lexicon manuale Graeco-Latinum et Latino-Graecum: Band 1 // https://books.google.ru/books?id=xHAUAAAAQAAJ
106. Liddell H. G., Scott R. A Greek-English Lexicon // http://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?-doc=Perseus%3Atext%3A1999.04.0057%3Aentry%3Dmoirognwmo%2Fnion
107. Большой Энциклопедический словарь (2002) / 2-е изд., перераб. и доп, с ил.
108. https://en.oxforddictionaries.com/definition/astrolabe

109. http://www.historyofinformation.com/expanded.php?id=2340
110. Field J. V., Wright M. T. (1985). The early history of mathematical gearing / Endeavour, Vol. 9, Iss. 4, pp. 198–203 // https://doi.org/10.1016/0160–9327(85)90078-X. (http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016093278590078X).
111. Astrolabe with Geared Calendar, by Muhammad b. Abi Bakr, Isfahan, 1221/2 // http://www.mhs.ox.ac.uk/object/inv/48213
112. Rados C. N. (1905). "Sur Les Trouvailles Astronomiques d'Anticythère" in Comptes rendus du Congrès international d'archéologie, 1re session, Athènes 1905, sous la présidence de S. A. R. le Prince Royal des Hellènes, président de la Société archéologique. 1re Session, 7–13 Avril, Athènes, Athènes, pp. 256–258 // https://archive.org/details/comptesrendusducooconguoft
113. Жуков А. (2010). По страницам сочинения Герона Александрийского «О диоптре» // Квант. № 3. С. 23–25.
114. Jones A. The Antikythera Mechanism and the Public Face of Greek Science / Proceedings of Science PoS (Antikythera & SKA) 038, 2012 // http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=170
115. Cicero M. T. Librorum de Re Publica Sex. C. F. W. Mueller. Leipzig. Teubner. 1889 // http://data.perseus.org/citations/urn: cts: latinLit: phio474.phio43.perseus-lat1:1.21
116. Jones A. R. (2018). Like Opening a Pyramid and Finding an Atomic Bomb: Derek de Solla Price and the Antikythera Mechanism / Proceedings of the American Philosophical Society, Vol. 162, Iss. 3, pp. 259–294 // https://www.amphilsoc.org/sites/default/files/2019–03/attachments/Jones.pdf
117. Мерчант Д. (2017). Антикитерский механизм: Самое загадочное изобретение Античности. — М.: Альпина нон-фикшн // https://www.google.ru/books?id=KkooDwAAQBAJ
118. de Solla Price D. (1974). Gears from the Greeks. The Antikythera Mechanism: A Calendar Computer from ca. 80 B. C. / Transactions of the American Philosophical Society, New Series, Vol. 64, No. 7 (1974), pp. 1–70 // http://www.jstor.org/stable/1006146
119. Poole L. (2017). Bromley's model of the Antikythera Mechanism // https://maas.museum/inside-the-collection/2017/11/01/bromleys-model-of-the-antikythera-mechanism/
120. Oates S., Bromley A. Decoding the Heavens: Mistakes and misinterpretations // http://www.connectives.com/decoding-the-heavens-bromley-comments.html
121. A Planetarium Display for the Antikythera Mechanism / Horological Journal, vol. 144, no. 5 (May 2002), pp. 169–173, and vol. 144, no. 6 (June 2002), p. 193.
122. Мерчант Д. (2017). Антикитерский механизм: Самое загадочное изобретение Античности. — М.: Альпина нон-фикшн // https://www.google.ru/books?id=KkooDwAAQBAJ
123. Evans J., Carman C. C., Thorndyke A. (2010). Solar anomaly and planetary displays in the Antikythera Mechanism / Journal for the History of Astronomy. xli: pp. 1–39 // http://adsabs.harvard.edu/full/2010JHA... 41... 1E
124. Freeth T., Higgon D., Dacanalis A., MacDonald L., Georgakopoulou M., Wojcik A. (2021). A Model of the Cosmos in the ancient Greek Antikythera Mechanism / Scientific Reports, Vol. 11, Article number: 5821 // https://doi.org/10.1038/s41598–021–84310-w
125. Experts recreate a mechanical Cosmos for the world's first computer (2021) / UCL News, 12 March 2021 // https://www.ucl.ac.uk/news/2021/mar/experts-recreate-mechanical-cosmos-worlds-first-computer
126. Byzantine portable universal altitude sundial with geared calendrical device // http://collection.sciencemuseum.org.uk/objects/co1082/byzantine-portable-universal-altitude-sundial-with-geared-calendrical-device-sundial-perpetual-calendar
127. Pappus, Hultsch F. O. (1878). Pappi Alexandrini collectionis quae supersunt. Apud Weidmannos // https://archive.org/stream/pappialexandrino2hultgoog#page/n33/mode/2up
128. Wright M. (2012). The Planetarium of Archimedes // http://hist.science.online.fr/antikythera/DOCS/THE%20PLANETARIUM%20OF%20ARCHIMEDES.pdf
129. Freeth, Tony; Jones, Alexander (2012). The Cosmos in the Antikythera Mechanism. Institute for the Study of the Ancient World // http://dlib.nyu.edu/awdl/isaw/isaw-papers/4/
130. Математика XVII столетия (1970) // История математики: в 3 т. / под ред. А. П. Юшкевича. — М.: Наука. Т. II. С. 54–48 // http://ilib.mccme.ru/djvu/istoria/istmat2.htm
131. Клейн Ф. (1987). Элементарная математика с точки зрения высшей. — М.: Наука. Т. I. Арифметика. Алгебра. Анализ. С. 210 // http://ilib.mccme.ru/djvu/klejn-1.htm

132. Карпушкина Н. (2011). Решётчатое умножение // Наука и жизнь. № 2 // https://www.nkj.ru/archive/articles/19204/
133. Stoianovich T. (2015). Balkan Worlds: The First and Last Europe: The First and Last Europe. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=lKVzCQAAQBAJ
134. Woodhead C. (2011). The Ottoman World. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=-jt_FBQAAQBAJ
135. Corlu M. S., Burlbaw L. M., Capraro R. M., Han S., Çorlu M. A. (2010). The Ottoman palace school and the man with multiple talents, Matrakçı Nasuh / Journal of the Korea Society of Mathematical Education Series D: Research in Mathematical Education, Vol. 14, Iss. 1, pp. 19–31 // https://www.academia.edu/480968/Corlu_M._S._Burlbaw_L._M._Capraro_R._M._Han_S._and_%C3%87orlu_M._A._2010_._The_Ottoman_palace_school_and_the_man_with_multiple_talents_Matrak%C3%A7%C4%B1_Nasuh._Journal_of_the_Korea_Society_of_Mathematical_Education_Series_D_Research_in_Mathematical_Education_14_1_19_31
136. Celebi E., von Hammer-Purgstall J. (1834). Narrative of Travels in Europe, Asia, and Africa in the Seventeenth Century. Oriental Translation Fund // https://books.google.ru/books?id=66hCAAAAcAAJ
137. Karagöz A. (2013). Nasûh Es-Silâhî'nin Umdetü'l Hisâb Adlı Eseri (89b-179a) (İnceleme-Metin-Dizin-Tıpkıbasım) // https://tezarsivi.com/nasuh-es-silahinin-umdetul-hisab-adli-eseri-89b-179a-inceleme-metin-dizin-tipkibasim
138. Цит. по: Bulletin of the Scientific Instrument Society No. 76 (2003) // https://static1.squarespace.com/static/54ec9b40e4b02904f4e09b74/t/5692c4becbced6b74bcb6067/1452459215241/SIS_Bulletin_076.pdf
139. Gradstein S. (1962). The Calculating Machine of Blaise Pascal / Philips technical review, Vol. 24, 1962 // http://nvhrbiblio.nl/biblio/tijdschrift/Philips%20Technical%20Review/Philips-Technical-Review-1962.pdf
140. Dalakov G. The Rechenuhr (Calculating Clock) of Wilhelm Schickard / History of Computers: hardware, software, internet… // http://history-computer.com/MechanicalCalculators/Pioneers/Schickard.html
141. Adamson D. (1994). Blaise Pascal: Mathematician, Physicist and Thinker about God. Palgrave Macmillan UK // https://books.google.ru/books?id=qpmGDAAAQBAJ
142. O'Connor J. J., Robertson E. F. Étienne Pascal / MacTutor History of Mathematics archive // http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Pascal_Etienne.html
143. Тарасов Б. Н. (2006). Паскаль. — М.: Молодая гвардия // https://books.google.ru/books?id=pq59AAAAMAAJ
144. Dalakov G. The Pascaline of Blaise Pascal / History of Computers: hardware, software, internet… // http://history-computer.com/MechanicalCalculators/Pioneers/Pascal.html
145. http://www.historicalstatistics.org/Currencyconverter.html
146. https://www.in2013dollars.com/us/inflation/2015?amount=2310
147. Dalakov G. The arithmometer of Thomas de Colmar / History of Computers: hardware, software, internet… // http://history-computer.com/MechanicalCalculators/19thCentury/Colmar.html
148. Leibniz Invents the Stepped Drum Gear Calculator / Jeremy Norman's HistoryOfInformation.com // http://www.historyofinformation.com/expanded.php?id=453
149. Doron Swade. Babbage, Charles / Oxford Dictionary of National Biography // https://doi.org/10.1093/ref: odnb/962
150. Dubbey J. M., Dubbey J. M. (2004). The Mathematical Work of Charles Babbage. Cambridge University Press // https://books.google.ru/books?id=gkWunaISTsgC
151. LMA/4050. REVEREND STEPHEN FREEMAN'S SCHOOL PONDERS END / London Metropolitan Archives: City of London // http://discovery.nationalarchives.gov.uk/details/r/db8b56cf-ea51–4c0b-ad46–320a2391d714
152. Woodhouse R. (1803). The Principles of Analytical Calculation. Cambridge University Press // https://books.google.ru/books?id=rEbnAAAAMAAJ
153. Lagrange J. L. (1797). Théorie des fonctions analytiques. Imprimerie de la République.
154. Agnesi M. G. (1748). Instituzioni analitiche: ad uso della gioventu' italiana. Nella Regia Ducal Corte // https://books.google.it/books?id=a7znPR4b4XkC
155. Hay D. C. (2002). Charles Babbage / Business Rules Journal Vol. 3, No. 2, Feb // http://www.brcommunity.com/a2002/b096.html
156. Swade D. Babbage, Charles / Oxford Dictionary of National Biography // https://doi.org/10.1093/ref: odnb/962
157. Henry F. H. I. (2019). Love, Sex, and the Noose: The Emotions of Sodomy in 18thCentury England / Elec-

tronic Thesis and Dissertation Repository, 6736 // https://ir.lib.uwo.ca/etd/6736
158. A Report of the Trial of the Reverend Thomas Jephson, for a Misdemeanor, at the Cambridge Summer Assizes, 1823, on Wednesday, July 23, Before Mr. Serjeant Bosanquet, and a Common Jury (1823) // https://books.google.ru/books?id=gZPfdOebxOoC
159. Simister L. (2015). Charles Babbage from the Beginning. Lulu.com // https://books.google.ru/books?id=YqJmCgAAQBAJ
160. Campbell-Kelly M., Aspray W., Ensmenger N., Yost J. R. (2013). Computer: A History of the Information Machine. Avalon Publishing // https://books.google.ru/books?id=0MZVDgAAQBAJ
161. Руденко Б. (2008). Бином Ньютона и треугольник Паскаля / Наука и жизнь. № 4 // https://www.nkj.ru/archive/articles/13598/
162. Computing the Nautical Almanac, Called the "Seaman's Bible" / Jeremy Norman's HistoryOfInformation.com // http://www.historyofinformation.com/expanded.php?id=485
163. May W. E., Jones S. S. D., Howard J. L., Logsdon T. S., Anderson E. W., Richey M. W. Navigation | technology / Encyclopædia Britannica // https://www.britannica.com/technology/navigation-technology-#ref363598
164. Higgitt R., Dunn R., Jones P. (2016). Navigational Enterprises in Europe and its Empires, 1730–1850. Palgrave Macmillan UK // https://books.google.ru/books?id=K8ObCwAAQBAJ
165. Parkinson B. W., Stansell T., Beard R., Gromov K. (1995). A History of Satellite Navigation / Navigation, Vol. 42, pp. 109–164 // https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/j.2161–4296.1995.tb02333.x
166. Stephanie P. (2011). Into the breeches: A makeover for Longitude's villain / New Scientist, Iss. 2814, published 28 May // https://www.newscientist.com/article/mg21028141–500-into-the-breeches-a-makeover-for-longitudes-villain/
167. Computing the Nautical Almanac, Called the "Seaman's Bible" / Jeremy Norman's HistoryOfInformation.com // http://www.historyofinformation.com/expanded.php?id=485
168. Dalakov G. The Differential Engine of Charles Babbage / History of Computers: hardware, software, internet… // http://history-computer.com/Babbage/DifferentialEngine.html
169. Howe J. (April 1840). "Manufacture of Pins". American Journal of Science and Arts, 38 (1): Appendix, p. 3 // https://archive.org/stream/mobot31753002152160#page/n225/mode/2up/search/howe
170. Campbell-Kelly M., Aspray W., Ensmenger N., Yost J. R. (2013). Computer: A History of the Information Machine. Avalon Publishing // https://books.google.ru/books?id=0MZVDgAAQBAJ
171. Babbage C., Morrision P., Morrison E. (2013). On the Principles and Development of the Calculator and Other Seminal Writings. Dover Publications // https://books.google.ru/books?id=FTXyAAAAQBAJ
172. Dalakov G. The Differential Engine of Charles Babbage / History of Computers: hardware, software, internet… // http://history-computer.com/Babbage/DifferentialEngine.html
173. https://www.in2013dollars.com/1820-GBP-in-2023?amount=35000
174. Waller D. (2016). Iron Men: How One London Factory Powered the Industrial Revolution and Shaped the Modern World. Anthem Press // https://books.google.ru/books?id=zLs1DgAAQBAJ
175. Toole B. A. (1998). Ada, the Enchantress of Numbers. Mill Valley, California: Strawberry Press // https://archive.org/details/adaenchantressofootool/page/38
176. Stein D. K. (1984). Lady Lovelace's Notes: Technical Text and Cultural Context / Victorian Studies, Vol. 28, No. 1 (Autumn, 1984), pp. 33–67 // https://www.jstor.org/stable/3826758
177. Campbell-Kelly M., Aspray W., Ensmenger N., Yost J. R. (2013). Computer: A History of the Information Machine. Avalon Publishing // https://books.google.ru/books?id=0MZVDgAAQBAJ
178. Hyman A. (1985). Charles Babbage: Pioneer of the Computer. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=YCddaWqWK2cC
179. Babbage C., Morrision P., Morrison E. (2013). On the Principles and Development of the Calculator and Other Seminal Writings. Dover Publications // https://books.google.ru/books?id=FTXyAAAAQBAJ
180. Dalakov G. The differential engine of Pehr-Georg and Edvard Scheutz / History of Computers: hardware, software, internet… // http://history-computer.com/Babbage/NextDifferentialEngines/Scheutz.html
181. Watson I. (2012). The Universal Machine: From the Dawn of Computing to Digital Consciousness. Springer Berlin Heidelberg // https://books.google.ru/books?id=jlmVKZ1psCkC
182. Dalakov G. The differential engine of Pehr-Georg and Edvard Scheutz / History of Computers: hardware,

software, internet… // http://history-computer.com/Babbage/NextDifferentialEngines/Scheutz.html
183. Collier B. (1991). Little Engines That Could'Ve: The Calculating Machines of Charles Babbage. Garland Publishing, Inc // http://robroy.dyndns.info/collier/
184. Giudice J. P. (2001). Complejidad y dimensiones en los estudios sobre Babbage: la máquina analítica. Un análisis del fracaso cultural del primer proyecto de calculadora digital programable secuencialmente / Argumentos de Razón Téchnica, No. 4 (2001), pp. 13–56 // http://institucional.us.es/revistas/argumentos/4/art_1.pdf
185. Babbage C., Morrision P., Morrison E. (2013). On the Principles and Development of the Calculator and Other Seminal Writings. Dover Publications // https://books.google.ru/books?id=FTXyAAAAQBAJ
186. Dalakov G. The differential engine of Pehr-Georg and Edvard Scheutz / History of Computers: hardware, software, internet… // http://history-computer.com/Babbage/NextDifferentialEngines/Scheutz.html
187. Swade D. D. (2005). The Construction of Charles Babbage's Difference Engine No. 2 / IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 27, pp. 70–78 // https://ieeexplore.ieee.org/document/1498720/
188. Babbage printer finally runs (2000) / BBC News // http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/710950.stm
189. Dalakov G. The Analytical Engine of Charles Babbage / History of Computers: hardware, software, internet… // http://history-computer.com/Babbage/AnalyticalEngine.html
190. Collier B. (1991). Little Engines That Could'Ve: The Calculating Machines of Charles Babbage. Garland Publishing, Inc // http://robroy.dyndns.info/collier/
191. Bromley A. G. (1998). Charles Babbage's Analytical Engine, 1838. IEEE Ann. Hist. Comput., 20, 29–45 // http://athena.union.edu/~hemmendd/Courses/cs80/an-engine.pdf
192. Shuttleworth M. (2011). Heron's Inventions / Explorable.com, Retrieved Sep 03, 2023 // https://explorable.com/heron-inventions
193. Rice W. G. (1915). Tower Music of Belgium and Holland / The Musical Quarterly, Vol. 1, pp. 198–215 // http://www.jstor.org/stable/737846
194. Fowler C. B. (1967). The Museum of Music: A History of Mechanical Instruments. Music Educators Journal, Vol. 54, Iss. 2, pp. 45–49 // https://doi.org/10.2307/3391092
195. Keranen R. (2016). Inventions in Computing: From the Abacus to Personal Computers. Cavendish Square Publishing // https://books.google.ru/books?id=BHdmDwAAQBAJ
196. Dalakov G. Basile Bouchon / History of Computers: hardware, software, internet… // http://history-computer.com/Dreamers/Bouchon.html
197. Broudy E. (1993). The Book of Looms: A History of the Handloom from Ancient Times to the Present. University Press of New England // https://books.google.ru/books?id=shN5_-W1RzcC
198. Dalakov G. Jacques de Vaucanson / History of Computers: hardware, software, internet… // http://history-computer.com/Dreamers/Vaucanson.html
199. Keranen R. (2016). Inventions in Computing: From the Abacus to Personal Computers. Cavendish Square Publishing // https://books.google.ru/books?id=BHdmDwAAQBAJ
200. Dalakov G. Joseph-Marie Jacquard / History of Computers: hardware, software, internet… // http://history-computer.com/Dreamers/Jacquard.html
201. Полетаев В. Н. Жаккарда машина / Большая советская энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия, 1969–1978 // https://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/86903/Жаккарда
202. http://www.historicalstatistics.org/Currencyconverter.html
203. Dalakov G. Joseph-Marie Jacquard / History of Computers: hardware, software, internet… // http://history-computer.com/Dreamers/Jacquard.html
204. Sterling B. (2017). Charles Babbage left a computer program in Turin in 1840. Here it is / Wired, 05.14.2017 // https://www.wired.com/beyond-the-beyond/2017/05/charles-babbage-left-computer-program-turin-1840/
205. Oliveira-Pinto F. (1991). On a Visit by Charles Babbage to Turin in 1840. UC Biblioteca Geral 1 // https://books.google.ru/books?id=h8z2RKVV1BoC
206. Sterling B. (2017). Charles Babbage left a computer program in Turin in 1840. Here it is / Wired, 05.14.2017 // https://www.wired.com/beyond-the-beyond/2017/05/charles-babbage-left-computer-program-turin-1840/
207. Babbage C. (1864). Passages from the Life of a Philosopher. Longman, Green, Longman, Roberts & Green // https://archive.org/details/passagesfromlife01babbgoog/page/n150
208. Menabrea L. F. (1842). Notions sur la machine analytique de M. Charles Babbage / Bibliothèque Universelle de Genève, Nouvelle série 41, pp. 352–376 // http://www.bibnum.education.fr/sites/default/files/babage-menabrea-texte-final.pdf

209. Menabrea L. F., Babbage C., Lovelace A. K. C., L A. A. (1843). Sketch of the Analytical Engine invented by Charles Babbage … with notes by the translator. Extracted from the 'Scientific Memoirs,' etc. [The translator's notes signed: A.L.L. ie. Augusta Ada King, Countess Lovelace.]. R. & J. E. Taylor // https://books.google.ru/books?id=hPRmnQEACAAJ
210. Wolfram S. (2015). Untangling the Tale of Ada Lovelace / Stephen Wolfram Writings // https://writings.stephenwolfram.com/2015/12/untangling-the-tale-of-ada-lovelace/
211. Chiaverini J. (2017). Enchantress of Numbers: A Novel of Ada Lovelace. Penguin Publishing Group // https://books.google.ru/books?id=r5BTDgAAQBAJ
212. Misa T. J. (2015). Charles Babbage, Ada Lovelace, and the Bernoulli Numbers / Hammerman R., Russell A. L. (2015). Ada's Legacy: Cultures of Computing from the Victorian to the Digital Age. Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool // https://doi.org/10.1145/2809523.2809527
213. De Morgan S. E., De Morgan A. (2010). Memoir of Augustus De Morgan: With Selections from His Letters. Cambridge University Press // https://books.google.ru/books?id=QsaQb6r3dwMC
214. Bromley A. G. (1982). Charles Babbage's Analytical Engine, 1838 / IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 4, Iss. 3, pp. 197–217 // https://doi.org/10.1109/mahc.1982.10028
215. Menabrea L. F., Babbage C., Lovelace A. K. C., L A. A. (1843). Sketch of the Analytical Engine invented by Charles Babbage … with notes by the translator. Extracted from the 'Scientific Memoirs,' etc. [The translator's notes signed: A.L.L. ie. Augusta Ada King, Countess Lovelace.]. R. & J. E. Taylor // https://books.google.ru/books?id=hPRmnQEACAAJ
216. Collier B., MacLachlan J. (2000). Charles Babbage: And the Engines of Perfection. Oxford University Press // https://books.google.ru/books?id= –vz-MEwf-bHEC
217. Toole B. A. (2010). Ada, the Enchantress of Numbers: Poetical Science. Critical Connection // https://books.google.ru/books?id=eWBpjlLMdQ4C
218. Stein D. (1985), Ada: A Life and a Legacy, MIT Press Series in the History of Computing, Cambridge, MA: The MIT Press // https://monoskop.org/images/e/e7/Stein_Dorothy_Ada_A_Life_and_a_Legacy.pdf
219. Brunel I. (2011). The Life of Isambard Kingdom Brunel, Civil Engineer. Cambridge University Press // https://books.google.ru/books?id=7kbGklaeTQQC
220. Lienhard J. H. (2003). The Engines of Our Ingenuity: An Engineer Looks at Technology and Culture. OUP USA // https://books.google.ru/books?id=qJdXre6oTokC
221. Risk R. B. (1893). Observed and Noted. Examiner printing house // https://books.google.ru/books?id= –HIUAQAAMAAJ
222. Ahearn B. (2012). Tennyson and Babbage / Tennyson Research Bulletin, Vol. 10, No. 1 (November 2012), pp. 53–65 // http://www.jstor.org/stable/45288571
223. Tennyson A., Collins J. C. (1900). The early poems of Alfred, Lord Tennyson. Frowde // https://books.google.ru/books?id=cITRcQAACAAJ
224. Dalakov G. The Analytical Engine of Charles Babbage / History of Computers: hardware, software, internet… // http://history-computer.com/Babbage/AnalyticalEngine.html
225. Henry Babbage's Analytical Engine Mill, 1910 // http://collection.sciencemuseum.org.uk/objects/co62246/henry-babbages-analytical-engine-mill-1910-analytical-engine-mills
226. Cohen I. B. (2000). Howard Aiken: Portrait of a Computer Pioneer. MIT Press // https://books.google.ru/books?id=Ld7TgLeQXs4C
227. Cohen I. B. (1988). Babbage and Aiken / IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 10, pp. 171–193 // http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/MAHC.1988.10029
228. Swade D. (2017). Spring 2017 report to the Computer Conservation Society / Plan 28 Blog // http://blog.plan28.org/2017/05/spring-2017-report-to-computer.html
229. Babbage Analytical Engine designs to be digitized / BBC News, 21 September 2011 // https://www.bbc.com/news/technology-15001514
230. Babbage's last laugh / The Economist, 9 September 1999 // https://www.economist.com/science-and-technology/1999/09/09/babbages-last-laugh
231. Sheepshanks R. (1860). A letter to the Board of visitors of the Greenwich royal observatory in reply to the calumnies of Mr. Babbage at their meeting in June 1853, and in his book entitled The exposition of 1851. London, Printed by G. Barclay // https://archive.org/details/alettertoboardvoobabbgoog/page/n101
232. Bromley A. G. (1982). Charles Babbage's Analytical Engine, 1838 / Annals of the History of Computing, Vol. 4, Num. 3 // https://anthony-zhang.me/blog/rod-logic/an-engine.pdf
233. Bard A., Söderqvist J. (2012). The Futurica Trilogy. Stockholm Text // https://books.google.ru/books?id=l-WCBwAAQBAJ

234. Hacking I. (1982). Biopower and the avalanche of printed numbers / Humanities in Society // https://s3.amazonaws.com/arena-attachments/778687/622e0ba69d28d9ff4049b1bc81462079.pdf
235. Hacking I. (1990). The Taming of Chance. Cambridge University Press // https://books.google.ru/books?id=KffZAQAAQBAJ
236. Dalakov G. Tabulating machine of Herman Hollerith / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Basis/TabulatingMachine_Hollerith.html
237. Muirhead J. F. (1963). John Shaw Billings. New England Journal of Medicine, Vol. 268, Iss. 14, pp. 778–779 // https://doi.org/10.1056/nejm196304042681409
238. Dalakov G. Tabulating machine of Herman Hollerith / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Basis/TabulatingMachine_Hollerith.html
239. Truesdell L. E. (1965). The development of punch card tabulation in the Bureau of the Census, 1890–1940: with outlines of actual tabulation programs. U. S. G.P.O // https://books.google.ru/books?id=MGZqAAAAMAAJ
240. Wright C. D. (1966). The history and growth of the United States census [1790–1890] prepared for the Senate Committee on the Census. U. S. Govt. Print. Off, Johnson Reprint Corp // http://hdl.handle.net/2027/mdp.39015007025003
241. Ruggles S., Magnuson D. L. (2018). Capturing the American People: Census Technology and Institutional Change, 1790–2020 / MPC Working Papers Series. No. 2 // https://pop.umn.edu/sites/pop.umn.edu/files/ruggles_magnuson_capturing-2.pdf
242. Dalakov G. Tabulating machine of Herman Hollerith / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Basis/TabulatingMachine_Hollerith.html
243. Truesdell L. E. (1965). The development of punch card tabulation in the Bureau of the Census, 1890–1940: with outlines of actual tabulation programs. U. S. G.P.O // https://books.google.ru/books?id=MGZqAAAAMAAJ
244. Strickland J. (2014). Hollerith and the “Punched Photograph” / Computer History Museum: Volunteer Information Exchange, Vol. 4, Iss. 3, February 20 // https://s3.amazonaws.com/s3data.computerhistory.org/chmedu/VIE_04_003.pdf
245. Karsakof S. (1832). Apercu d’un procédé nouveau d’investigation au moyen de machines à comparer les idées. St. Petersbourg.
246. Корсаков С. Н. (2009). Начертание нового способа исследования при помощи машин, сравнивающих идеи / Пер. с франц., под ред. А. С. Михайлова. — М.: МИФИ // http://www.raai.org/library/books/korsakov/korsakov_book.pdf
247. Михайлов А. С. (2016). Усиление возможностей разума — изобретения С. Н. Корсакова / Искусственный интеллект и принятие решений. № 2. С. 5–15 // http://www.aidt.ru/images/documents/2016–02/5_15.pdf
248. Ruggles S., Magnuson D. L. (2018). Capturing the American People: Census Technology and Institutional Change, 1790–2020 / MPC Working Papers Series. No. 2 // https://pop.umn.edu/sites/pop.umn.edu/files/ruggles_magnuson_capturing-2.pdf
249. Austrian G. D. (2016). Herman Hollerith: Forgotten Giant of Information Processing. BookBaby // https://books.google.ru/books?id=Kn1vjwEACAAJ
250. Ruggles S., Magnuson D. L. (2018). Capturing the American People: Census Technology and Institutional Change, 1790–2020 / MPC Working Papers Series. No. 2 // https://pop.umn.edu/sites/pop.umn.edu/files/ruggles_magnuson_capturing-2.pdf
251. Cartmell D. (2012). A Companion to Literature, Film, and Adaptation. Wiley // https://books.google.ru/books?id=63y9jREP6QEC
252. Ruggles S., Magnuson D. L. (2018). Capturing the American People: Census Technology and Institutional Change, 1790–2020 / MPC Working Papers Series. No. 2 // https://pop.umn.edu/sites/pop.umn.edu/files/ruggles_magnuson_capturing-2.pdf
253. Merriam W. R. (1903). The Evolution of American Census Taking / The Century illustrated monthly magazine, Vol. LXV, Apr. 1903 // https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015016778998; view=1up; seq=836
254. Ruggles S., Magnuson D. L. (2018). Capturing the American People: Census Technology and Institutional Change, 1790–2020 / MPC Working Papers Series. No. 2 // https://pop.umn.edu/sites/pop.umn.edu/files/ruggles_magnuson_capturing-2.pdf
255. Truesdell L. E. (1965). The development of punch card tabulation in the Bureau of the Census, 1890–1940: with outlines of actual tabulation programs. U. S. G.P.O // https://books.google.ru/books?id=MGZqAAAAMAAJ
256. Heide L. (2009). Punched-Card Systems and the Early Information Explosion, 1880–1945. Johns Hopkins University Press // https://books.google.ru/books?id=KVVIkZhuPnQC
257. Ruggles S., Magnuson D. L. (2018). Capturing the American People: Census Technology and Institutional Change, 1790–2020 / MPC Working Papers

Series. No. 2 // https://pop.umn.edu/sites/pop.umn.edu/files/ruggles_magnuson_capturing-2.pdf
258. Austrian G. D. (2016). Herman Hollerith: Forgotten Giant of Information Processing. BookBaby // https://books.google.ru/books?id=Kn1vjwEACAAJ
259. Dalakov G. Biography of Herman Hollerith / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/People/HollerithBio.html
260. Brooks J. (2004). Dreadnought Gunnery and the Battle of Jutland: The Question of Fire Control. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=dEmRAgAAQBAJ
261. Friedman N. (2013). Naval Firepower: Battleship Guns and Gunnery in the Dreadnought Era. Pen & Sword Books Limited // https://books.google.ru/books?id=h5m9AwAAQBAJ
262. Brooks J. (2004). Dreadnought Gunnery and the Battle of Jutland: The Question of Fire Control. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=dEmRAgAAQBAJ
263. Cockshott W. P., Cockshott P., Mackenzie L. M., Michaelson G. (2012). Computation and Its Limits. OUP Oxford // https://books.google.ru/books?id=U1Gcp1S__hEC
264. Sweetman J. (1997). The Great Admirals: Command at Sea, 1587–1945. Naval Institute Press // https://books.google.ru/books?id=_9Wi8IYe0owC
265. Brooks J. (2004). Dreadnought Gunnery and the Battle of Jutland: The Question of Fire Control. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=dEmRAgAAQBAJ
266. Stewart W. (2014). Admirals of the World: A Biographical Dictionary, 1500 to the Present. McFarland, Incorporated, Publishers // https://books.google.ru/books?id=S1VimlFIjQ0C
267. Brooks J. (2004). Dreadnought Gunnery and the Battle of Jutland: The Question of Fire Control. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=dEmRAgAAQBAJ
268. Sambrook S. C. (2015). The Optical Munitions Industry in Great Britain, 1888–1923. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=g-JBECgAAQBAJ
269. Sumida J. T. (1989). In Defence of Naval Supremacy: Finance, Technology and British Naval Policy, 1889–1914. Unwin Hyman Limited // https://books.google.ru/books?id=_Z7fAAAAMAAJ
270. Brooks J. (2004). Dreadnought Gunnery and the Battle of Jutland: The Question of Fire Control. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=dEmRAgAAQBAJ
271. Sumida J. T. (1989). In Defence of Naval Supremacy: Finance, Technology and British Naval Policy, 1889–1914. Unwin Hyman Limited // https://books.google.ru/books?id=_Z7fAAAAMAAJ
272. Jellicoe N. (2016). Jutland: The Unfinished Battle: A Personal History of a Naval Controversy. Seaforth Publishing // https://books.google.ru/books?id=20MmDQAAQBAJ
273. Brooks J. (2016). The Battle of Jutland. Cambridge University Press // https://books.google.ru/books?id=1uoIDAAAQBAJ
274. Pollen A. (1916). Naval events reviewed / Land & water, August 10 // https://archive.org/details/1916landawater200belluoft/page/152
275. Brooks J. (2004). Dreadnought Gunnery and the Battle of Jutland: The Question of Fire Control. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=dEmRAgAAQBAJ
276. Mindell D. A. (2002). Between Human and Machine: Feedback, Control, and Computing Before Cybernetics. Johns Hopkins University Press // https://archive.org/details/B-001–002–575/page/n39
277. Brooks J. (2004). Dreadnought Gunnery and the Battle of Jutland: The Question of Fire Control. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=dEmRAgAAQBAJ
278. Nathanial G. Ott (2010). Battlecruisers at Jutland: A Comparative Analysis of British and German Warship Design and its Impact on the Naval War. The Ohio State University // https://kb.osu.edu/bitstream/handle/1811/46765/Nathan_Ott_Thesis.pdf
279. Brooks J. (2004). Dreadnought Gunnery and the Battle of Jutland: The Question of Fire Control. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=dEmRAgAAQBAJ
280. Pollen A. (1980). The Great Gunnery Scandal: The Mystery of Jutland. Collins // https://books.google.ru/books?id=3yggAAAAMAAJ
281. Dreyer D. (1986). Early Developments in Naval Fire Control / The Naval Review, July 1986, pp. 238–241.
282. Jellicoe N. (2016). Jutland: The Unfinished Battle: A Personal History of a Naval Controversy. Seaforth Publishing // https://books.google.ru/books?id=20MmDQAAQBAJ
283. Brooks J. (2004). Dreadnought Gunnery and the Battle of Jutland: The Question of Fire Control. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=dEmRAgAAQBAJ
284. Clymer A. B. (1993). The mechanical analog computers of Hannibal Ford and William Newell. IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 15, Iss. 2, pp. 19–34.

285. Gallagher S. (2020). Gears of war: When mechanical analog computers ruled the waves / Ars Technica // https://arstechnica.com/information-technology/2020/05/gears-of-war-when-mechanical-analog-computers-ruled-the-waves/
286. Gallagher S. (2020). Gears of war: When mechanical analog computers ruled the waves / Ars Technica // https://arstechnica.com/information-technology/2020/05/gears-of-war-when-mechanical-analog-computers-ruled-the-waves/
287. Фейнман Р. Ф. (2001). Вы, конечно, шутите, мистер Фейнман! / Пер. с англ. Н. А. Зубченко, О. Л. Тиходеевой, М. Шифмана. — М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» // http://lib.ru/ANEKDOTY/FEINMAN/feinman.txt_with-big-pictures.html
288. Zuse K., Bauer F. L., McKenna P., Ross J. A., Zemanek H. (1993). The Computer — My Life. Springer // https://books.google.ru/books?id=Ro-5JOskbChAC
289. Dalakov G. Konrad Zuse — the first relay computer / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Relays/Zuse.html
290. Zuse K., Bauer F. L., McKenna P., Ross J. A., Zemanek H. (1993). The Computer — My Life. Springer // https://books.google.ru/books?id=Ro-5JOskbChAC
291. Dalakov G. Konrad Zuse — the first relay computer / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Relays/Zuse.html
292. Zuse K., Bauer F. L., McKenna P., Ross J. A., Zemanek H. (1993). The Computer — My Life. Springer // https://books.google.ru/books?id=Ro-5JOskbChAC
293. Dalakov G. Konrad Zuse / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/People/ZuseBio.html
294. Zuse K., Bauer F. L., McKenna P., Ross J. A., Zemanek H. (1993). The Computer — My Life. Springer // https://books.google.ru/books?id=Ro-5JOskbChAC
295. Dalakov G. Konrad Zuse — the first relay computer / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Relays/Zuse.html
296. Zuse K., Bauer F. L., McKenna P., Ross J. A., Zemanek H. (1993). The Computer — My Life. Springer // https://books.google.ru/books?id=Ro-5JOskbChAC
297. Dalakov G. Konrad Zuse — the first relay computer / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Relays/Zuse.html
298. Zuse K., Bauer F. L., McKenna P., Ross J. A., Zemanek H. (1993). The Computer — My Life. Springer // https://books.google.ru/books?id=Ro-5JOskbChAC
299. Dalakov G. Konrad Zuse — the first relay computer / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Relays/Zuse.html
300. Alex J. (1997). Wege und Irrwege des Konrad Zuse / Spektrum der Wissenschaft No. 1 // https://www.spektrum.de/magazin/wege-und-irrwege-des-konrad-zuse/823599
301. Dalakov G. Konrad Zuse — the first relay computer / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Relays/Zuse.html
302. Rojas R. (2016). The Design Principles of Konrad Zuse's Mechanical Computers // https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1603/1603.02396.pdf
303. Dalakov G. Konrad Zuse — the first relay computer / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Relays/Zuse.html
304. Zuse K., Bauer F. L., McKenna P., Ross J. A., Zemanek H. (1993). The Computer — My Life. Springer // https://books.google.ru/books?id=Ro5JOskbChAC
305. Dalakov G. Konrad Zuse — the first relay computer / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Relays/Zuse.html
306. Zuse K., Bauer F. L., McKenna P., Ross J. A., Zemanek H. (1993). The Computer — My Life. Springer // https://books.google.ru/books?id=Ro-5JOskbChAC
307. Zuse K. (1987). My First Computer and First Thoughts About Data Processing. Computer Design-Past, Present, Future, talk given by Prof. Konrad Zuse, in Lund / Sweden, Oct. 2; Lee J. A. N. (1995). Computer Pioneers // https://history.computer.org/pioneers/zuse.html
308. Dalakov G. Konrad Zuse — the first relay computer / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Relays/Zuse.html
309. Zuse K., Bauer F. L., McKenna P., Ross J. A., Zemanek H. (1993). The Computer — My Life. Springer // https://books.google.ru/books?id=Ro-5JOskbChAC

310. Alex J. (1997). Wege und Irrwege des Konrad Zuse / Spektrum der Wissenschaft Nr. 1 // https://www.spektrum.de/magazin/wege-und-irrwege-des-konrad-zuse/823599
311. Zuse K. (1969). Rechnender Raum. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn.
312. Zuse K. (1970). Calculating Space (Rechnender Raum). MIT Technical Translation AZT-70–164-GEMIT, Massachusetts Institute of Technology (Project MAC), Cambridge, Mass. 02139. Adrian German and Hector Zenil (eds) re-edition in LaTeX with permission of MIT and Zuse's family, 2012 // http://www.mathrix.org/zenil/ZuseCalculating-Space-GermanZenil.pdf
313. Peters A. (2000). Was ist und wie verwirklicht sich Computer-Sozialismus: Gespräche mit Konrad Zuse. Verlag Neues Leben, Berlin.
314. Dalakov G. The MARK computers of Howard Aiken / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Relays/Aiken.html
315. Chase G. C. (1980). History of Mechanical Computing Machinery (with foreword by I. Bernard Cohen) / Annals of the History of Computing, Vol. 2, pp. 198–226 // http://www.rechenmaschinen-illustrated.com/pdf/chase.pdf
316. Aiken H. (1989). Perspectives on the Computer Revolution. Ablex Publishing Corp // https://history-computer.com/Library/AikenProposal.pdf
317. Dalakov G. The MARK computers of Howard Aiken / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Relays/Aiken.html
318. Edison to Puskas, 13 ноября 1878, Edison papers, Edison National Laboratory, U. S. National Park Service, West Orange, N. J., цит. по: Forsyth M. (2011). The Etymologicon: A Circular Stroll through the Hidden Connections of the English Language. Icon Books Limited.
319. Dalakov G. The MARK computers of Howard Aiken / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Relays/Aiken.html
320. Wilkes M. V. (1956). Automatic Digital Computers. New York: John Wiley & Sons., pp. 16–20 // https://books.google.ru/books?id=n_oNAAAAQAAJ
321. Cohen I. B., Welch G. W., Campbell R. V. D. (1999). Makin' Numbers: Howard Aiken and the Computer. MIT Press // https://books.google.ru/books?id=lVfX5wMkI70C
322. https://www.reddit.com/r/AskScienceDiscussion/comments/49ut8e/ive_seen_a_whole_bunch_of_things_nominated_for/
323. Ceruzzi P. E. (1991). When Computers Were Human / IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 13, Iss. 3 // https://ieeexplore.ieee.org/document/4638252
324. Wikipedia contributors. (2019, March 26). Church–Turing thesis. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 03:00, March 28, 2019, from https://en.wikipedia.org/wiki/Church%E2%80%93Turing_thesis
325. Herbrand J., van Heijenoort J., Goldfarb W. D. (2012). Logical Writings. Springer Netherlands // https://books.google.ru/books?id=zOXqCAAAQBAJ
326. Kreisel G. (1980). Kurt Godel. 28 April 1906–14 January 1978 / Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society, Vol. 26, pp. 148–224 // https://doi.org/10.1098/rsbm.1980.0005
327. Dawson J. (2005). Logical Dilemmas: The Life and Work of Kurt Gödel. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=gA8SucCU1AYC
328. Goldstein R. (2006). Incompleteness: The Proof and Paradox of Kurt Gödel (Great Discoveries). W. W. Norton // https://books.google.ru/books?id=tXk2AAAAQBAJ
329. Wang H. (1997). A Logical Journey: From Gödel to Philosophy. MIT Press // https://books.google.ru/books?id=pckvCy6L_ocC
330. Dawson J. (2005). Logical Dilemmas: The Life and Work of Kurt Gödel. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=gA8SucCU1AYC
331. Wang H. (1997). A Logical Journey: From Gödel to Philosophy. MIT Press // https://books.google.ru/books?id=pckvCy6L_ocC
332. Feferman S. (1998). In the Light of Logic // https://books.google.ru/books?id=AadVrcnschMC
333. Dawson J. (2005). Logical Dilemmas: The Life and Work of Kurt Gödel. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=gA8SucCU1AYC
334. Dawson J. (2005). Logical Dilemmas: The Life and Work of Kurt Gödel. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=gA8SucCU1AYC
335. Morgan D. F. (2008). Descendants of Sir John Turing and Henry Turing // https://www.mit.edu/~dfm/genealogy/turing.html
336. M'Kenzie H. (1850). The lay of the Turings: (A.D. 1316–1849.) A sketch of the family history, feebly conceived and imperfectly executed: now dedicated to the Chief with the sincerest respect and affection, by H. M'K // https://deriv.nls.uk/dcn23/9549/95491600.23.pdf

337. Тюрин Е. А. (2012). Сквозь пространство и время (к столетию Алана Тюринга) / Вестник государственного и муниципального управления. № 2 // https://cyberleninka.ru/article/n/skvoz-prostranstvo-i-vremya
338. Turing S. (2012). Alan M. Turing: Centenary Edition. Cambridge University Press // https://books.google.ru/books?id=07_ckaHY-2QC
339. Тюрин Е. А. (2012). Сквозь пространство и время (к столетию Алана Тюринга) / Вестник государственного и муниципального управления. № 2 // https://cyberleninka.ru/article/n/skvoz-prostranstvo-i-vremya
340. Hedron N. (2012). A Valentine Memoriam: Alan Turing + Christopher Morcom / The Turing Centenary (+ Bicentennial), February 13, 2012 // https://theturingcentenary.wordpress.com/2012/02/13/a-valentine-memoriam-alan-turing-christopher-morcom/
341. Тюрин Е. А. (2012). Сквозь пространство и время (к столетию Алана Тюринга) / Вестник государственного и муниципального управления. № 2 // https://cyberleninka.ru/article/n/skvoz-prostranstvo-i-vremya
342. Turing A. M. (1937). On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. Proceedings of the London Mathematical Society, s2–42(1), pp. 230–265 // https://www.cs.virginia.edu/~robins/Turing_Paper_1936.pdf
343. Кокшотт У. П., Микаэльсон Г., Коттрел А. (2017). Бёттке, синтаксис и тест Тьюринга / Пер. с англ. Горлова А. В., Маркова С. С. // https://22century.ru/popular-science-publications/boettke-syntax-and-the-turing-test
344. Rojas R. (1996). Konrad Zuse's Legacy: The Architecture of the Z1 and Z3 / IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 19, No. 2, 1997 // http://page.mi.fu-berlin.de/rojas/1996/Konrad_Zuses_Legacy.pdf
345. Профессор Рауль Рохас, персональные коммуникации.
346. Bloch R. (1984–02–22). Oral history interview with Richard M. Bloch // https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/107123/oh066rb.pdf
347. Dalakov G. The ENIAC of John Mauchly and John Eckert / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Electronic/ENIAC.html
348. Sendov B. (2001). John Atanasoff. The Man Who Invented the Computer // https://web.archive.org/web/20180306172639/http://www.johnatanasoff.com:80/pride_in_Bulgaria.php
349. Атанасов Дж. (1985). До моята бащина земя // https://webstage.bg/istoriya/4187-do-moyata-bashtina-zemya-dzhon-atanasov.html
350. https://www.census.gov/prod/cen2010/cph-1–11.pdf
351. Taylor J. M. (1882). A College Algebra. Boston. Allyn and Bacon // https://books.google.ru/books?id=0wg_AQAAMAAJ
352. Mollenhoff C. R. (1988). Atanasoff: Forgotten Father of the Computer. Iowa State University Press // https://books.google.ru/books?id=n50mAAAAMAAJ
353. Howarth R. J. (2017). Dictionary of Mathematical Geosciences: With Historical Notes. Springer International Publishing // https://books.google.ru/books?id=MNwlDwAAQBAJ
354. Mobley B. P. (2001). The ingenuity of common workmen: and the invention of the computer. Retrospective Theses and Dissertations. 660. Iowa State University // https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1659&context=rtd
355. Соловьёва О. (2000). Водяные вычислительные машины / Наука и жизнь. № 4 // https://www.nkj.ru/archive/articles/7033/
356. Smiley J. (2010). The Man Who Invented the Computer. Knopf Doubleday Publishing Group // https://books.google.ru/books?id=3ImIFEZrDjYC
357. Burton T. (2006). World Changer: Atanasoff and the Computer. Tangra TanNakRa // https://books.google.ru/books?id=1YMfAQAAIAAJ
358. Burks A. R., Burks A. W. (1989). The First Electronic Computer: The Atanasoff Story. University of Michigan Press // https://books.google.ru/books?id=_Zja6hoP4psC
359. da Cruz F. Programming the ENIAC / Columbia University Computing History: A Chronology of Computing at Columbia University // http://www.columbia.edu/cu/computinghistory/eniac.html
360. Dalakov G. The ABC of John Atanasoff and Clifford Berry / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Electronic/Atanasoff.html
361. Alt F. L. (1972). Archaelogy of computers: reminiscences, 1945–1947 / Communications of the ACM, Vol. 15, Iss. 7, pp. 693–694 // https://doi.org/10.1145/361454.361528
362. Grier D. (2004). From the Editor's Desk / IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 26, Iss. 3, pp. 2–3 // https://doi.org/10.1109/MAHC.2004.9

363. Alt F. L. (1972). Archaelogy of computers: reminiscences, 1945–1947 / Communications of the ACM, Vol. 15, Iss. 7, pp. 693–694 // https://doi.org/10.1145/361454.361528
364. Fritz W. B. (1996). The Women of ENIAC / IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 18, Iss. 3, pp. 13–28 // https://doi.org/10.1109/85.511940
365. Randall 5th, Alexander (2006–02–14). "A lost interview with ENIAC co-inventor J. Presper Eckert". Computer World // https://www.computerworld.com/article/2561813/q-a — a-lost-interview-with-eniac-co-inventor-j — presper-eckert.html
366. Igarashi Y., Altman T., Funada M., Kamiyama B. (2014). Computing: A Historical and Technical Perspective. Taylor & Francis // https://books.google.ru/books?id=58ySAwAAQBAJ
367. Rejewski M. (1981). How Polish Mathematicians Deciphered the Enigma / IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 3, No. 3, July // http://chc60.fgcu.edu/images/articles/rejewski.pdf
368. Singh S. (2000). The Code Book: The Science of Secrecy from Ancient Egypt to Quantum Cryptography. Anchor Books // https://books.google.ru/books?id=skt7TrLK5uYC
369. Rejewski M. (1981). How Polish Mathematicians Deciphered the Enigma / IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 3, Iss. 3 // http://chc60.fgcu.edu/images/articles/rejewski.pdf
370. Stengers J. (2004). Enigma, the French, the Poles and the British 1931–1940. Revue belge de Philologie et d'Histoire, 82–1–2 // https://www.persee.fr/doc/rbph_0035–0818_2004_num_82_1_4836
371. Hinsley F. H. (1996). The Influence of ULTRA in the Second World War // https://web.archive.org/web/20120417052645/http://www.cl.cam.ac.uk/research/security/Historical/hinsley.html
372. Cawthorne N. (2014). Alan Turing: The Enigma Man. Arcturus Publishing // https://books.google.ru/books?id=6qmJBAAAQBAJ
373. Budiansky S. (2000). Battle of Wits: The Complete Story of Codebreaking in World War II. Free Press // https://books.google.ru/books?id=uccLlgJDk4gC
374. Toms S. (2005). Enigma and the Eastcote connection // https://web.archive.org/web/20081204105055/http://www.ruislip.co.uk/eastcotemod/enigma.htm
375. Alexander C. H. O'D. (c. 1945). Cryptographic History of Work on the German Naval Enigma / The National Archives, Kew, Reference HW 25/1 // http://www.ellsbury.com/gne/gne-000.htm
376. Dalakov G. Colossus computer of Max Newman and Tommy Flowers / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Electronic/Colossus.html
377. Hinsley F. H., Stripp A. (2001). Codebreakers: The Inside Story of Bletchley Park. Oxford University Press // https://books.google.ru/books?id=j1M-C2d2LPAcC
378. Dalakov G. Colossus computer of Max Newman and Tommy Flowers / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Electronic/Colossus.html
379. Copeland B. J. (2010). Colossus: The Secrets of Bletchley Park's Code-breaking Computers. OUP Oxford // https://books.google.ru/books?id=M2sVDAAAQBAJ
380. Dalakov G. Colossus computer of Max Newman and Tommy Flowers / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Electronic/Colossus.html
381. Copeland B. J. (2010). Colossus: The Secrets of Bletchley Park's Codebreaking Computers. OUP Oxford // https://books.google.ru/books?id=M2sVDAAAQBAJ
382. Neumann C. E. (2004). The Labouchère Amendment (1885–1967) // http://www.glbtqarchive.com/ssh/labouchere_amendment_S.pdf
383. Hodges A. (2014). Alan Turing: The Enigma: The Book That Inspired the Film The Imitation Game — Updated Edition. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=QnUPBAAAQBAJ
384. Leavitt D. (2015). The Man Who Knew Too Much: Alan Turing and the Invention of the Computer. Hachette UK // https://books.google.ru/books?id=OPVGBQAAQBAJ
385. Hodges A. (2014). Alan Turing: The Enigma: The Book That Inspired the Film The Imitation Game — Updated Edition. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=QnUPBAAAQBAJ
386. Garner A. (2011). My hero: Alan Turing, by Alan Garner / The Guardian, 11 Nov // https://www.theguardian.com/books/2011/nov/11/alan-turing-my-hero-alan-garner
387. Leavitt D. (2015). The Man Who Knew Too Much: Alan Turing and the Invention of the Com-

puter. Hachette UK // https://books.google.ru/books?id=OPVGBQAAQBAJ
388. Cohn J. (2019). The Burden of Choice: Recommendations, Subversion, and Algorithmic Culture. Rutgers University Press // https://books.google.ru/books?id=DAC-DwAAQBAJ
389. Hailperin M., Kaiser B., Knight K. (1999). Concrete Abstractions: An Introduction to Computer Science Using Scheme // https://books.google.ru/books?id=yYyVRueWlZ8C
390. Copeland B. J. (2012). Turing suicide verdict in doubt // https://web.archive.org/web/20120629090527/http://fds.oup.com/www.oup.co.uk/pdf/general/popularscience/jack-copelandjune
391. Hodges A. (2014). Alan Turing: The Enigma: The Book That Inspired the Film The Imitation Game — Updated Edition. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=QnUPBAAAQBAJ
392. Dalakov G. Colossus computer of Max Newman and Tommy Flowers / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Electronic/Colossus.html
393. Honour for Colossus code-cracker (2008) / BBC News // http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/7213215.stm
394. Dalakov G. Colossus computer of Max Newman and Tommy Flowers / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Electronic/Colossus.html
395. Башир Рамеев: отец советских компьютеров, внук Дэрдменда и друг Ботвинника / БИЗНЕС Online, 16.12.2018 // https://www.business-gazeta.ru/article/406454
396. История, которую стоит переписать: где на самом деле сделали первый советский компьютер / Индикатор: интернет-издание // https://indicator.ru/article/2018/04/17/pervyj-sovetskij-kompyuter/
397. Малиновский Б. Н. (2012). Первая отечественная ЭВМ и её создатели (к 40-летию ввода МЭСМ в регулярную эксплуатацию) / Кибертония. № 1 // http://www.computer-museum.ru/books/lebedev_kibertonia.pdf
398. Сергей Алексеевич Лебедев. К 100-летию со дня рождения основоположника отечественной электронной вычислительной техники / Отв. ред. В. С. Бурцев. Составители Ю. Н. Никольская, А. Н. Томилин, Ю. В. Никитин, Н. С. Лебедева. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002 // http://infolymp.ru/resources/library/files/lebedev.pdf
399. История, которую стоит переписать: где на самом деле сделали первый советский компьютер / Индикатор: интернет-издание // https://indicator.ru/article/2018/04/17/pervyj-sovetskij-kompyuter/
400. Рогачёв Ю. В. (2008). АЦВМ М-1 / Виртуальный компьютерный музей // http://www.computer-museum.ru/histussr/m1_2.htm
401. История, которую стоит переписать: где на самом деле сделали первый советский компьютер / Индикатор: интернет-издание // https://indicator.ru/article/2018/04/17/pervyj-sovetskij-kompyuter/
402. Дмитриева И. (2002). Эскиз к портрету на фоне ЭВМ. К 100-летию И. С. Брука / itWeek. № 42 (360) // https://www.itweek.ru/themes/detail.php?ID=63019
403. Коган Б. Я., Казьмин А. И., Назарова В. П., Спиро А. Г. (1967). Гибридные вычислительные системы и основные области их применения. Итоги науки. Теория вероятностей, Математическая статистика, Теория кибернетики. — М.: ВИНИТИ // http://mi.mathnet.ru/intv9
404. Федотов А. М. (2013). Компьютер аналоговый / Словарь терминов в коллекции «Современные проблемы информатики» & «Вычислительные системы». Новосибирский государственный университет // http://www.nsc.ru/win/elbib/data/show_page.dhtml?77+87
405. Брусенцов Н. П. (2008). Из истории создания троичных цифровых машин в МГУ / Виртуальный компьютерный музей // http://www.computer-museum.ru/histussr/setun_hist.htm
406. Of ozone and fruit flies. A german, a dutchman and seven americans win the science prizes (1995) / Time, Oct. 23, 1995 // http://content.time.com/time/subscriber/article/0,33009,983602–1,00.html
407. Schaeffer J. (2013). One Jump Ahead: Challenging Human Supremacy in Checkers. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=HKfqBwAAQBAJ
408. Пчела / Подготовка текста, перевод и комментарии В. В. Колесова. Текст приводится по новгородской рукописи XIV в. РНБ, F.п.I.44, в издании: Семёнов В. Древнерусская «Пчела» по пергаменному списку. СПб., 1893, с. 1–444 / Электронные публикации Института русской

литературы (Пушкинского Дома) РАН // http://lib2.pushkinskijdom.ru/tabid-4968
409. Яглом И. М. (1971). Две игры со спичками / Квант. № 2 // http://kvant.mccme.ru/1971/02/dve_igry_so_spichkami.htm
410. Jorgensen A. H. (2009). Context and driving forces in the development of the early computer game Nimbi / IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 31, Iss. 3, pp. 44–53 // https://doi.org/10.1109/MAHC.2009.41
411. Bouton C. L. (1901–1902). Nim, A Game with a Complete Mathematical Theory / The Annals of Mathematics, 2nd Ser., Vol. 3, No. 1/4. (1901–1902), pp. 35–39 // https://paradise.caltech.edu/ist4/lectures/Bouton1901.pdf
412. Dalakov G. The Nimatron of Edward Condon / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Relays/Condon.html
413. Weiner C. (1968). Edward Condon — Session II. Oral History Interviews. Interviews that offer unique insights into the lives, works, and personalities of modern scientists / American Institute of Physics // https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4997–2
414. См. патент «Machine to play game of nim». 1940–09–24 (https://patents.google.com/patent/US2215544).
415. Dreher T. (2015). History of Computer Art // http://iasl.uni-muenchen.de/links/GCA.pdf
416. Flesch R. (1951). The Art of Clear Thinking. — 1. — New York, USA: Harper & Brothers Publishers // https://dc135.files.wordpress.com/2012/11/flesch-the-art-of-clear-thinking.pdf
417. Rougetet L. (2016). Machines designed to play Nim games. Teaching supports for mathematics, algorithmics and computer science (1940–1970) // https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01349260/document
418. Dalakov G. The Nimatron of Edward Condon / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Relays/Condon.html
419. Rougetet L. (2016). Machines designed to play Nim games. Teaching supports for mathematics, algorithmics and computer science (1940–1970) // https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01349260/document
420. Dalakov G. The Nimatron of Edward Condon / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/ModernComputer/Relays/Condon.html
421. Redheffer R. (1948). A Machine for Playing the Game Nim / The American Mathematical Monthly, Vol. 55, Iss. 6, pp. 343–349 // https://doi.org/10.1080/00029890.1948.11999249
422. Rougetet L. (2016). Machines designed to play Nim games. Teaching supports for mathematics, algorithmics and computer science (1940–1970) // https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01349260/document
423. Moynihan D. P. (1998). Secrecy: The American Experience. Yale University Press // https://books.google.ru/books?id=FWq-5a5tqHoC
424. Sagan C. (1996). The Demon-Haunted World: Science as a Candle in the Dark. New York: Ballantine Books // https://books.google.ru/books?id=Yz8Y6K-fXf9UC
425. Wheeler J. A. (1998). Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics. New York: W. W. Norton // https://books.google.ru/books?id=zGFkK2t-TXPsC
426. Sturrock P. A. (1987). An Analysis of the Condon Report on the Colorado UFO Project / Journal of Scientific Exploration // https://web.archive.org/web/20120717083947/http://www.ufoskeptic.org/sturrock/1.html
427. Carlisle R. P. (2009). Encyclopedia of Play in Today's Society. SAGE Publications // https://books.google.ru/books?id=jLqXM3U_pzEC
428. Applebaum B., DiSorbo D., Ferrari M. (2016). Recess: From Dodgeball to Double Dutch: Classic Games for Players of Today. Chronicle Books LLC // https://books.google.ru/books?id=SzQB-CwAAQBAJ
429. Wikipedia contributors. (2019, April 15). Tic-tac-toe. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 04:41, April 15, 2019, from https://en.wikipedia.org/wiki/Tic-tac-toe
430. Parker M. (1995). She Does Math!: Real-life Problems from Women on the Job. Mathematical Association of America // https://books.google.ru/books?id=N4nmGjq5dWsC
431. Zaslavsky C. (1998). Math Games and Activities from Around the World. Chicago Review Press, Incorporated // https://books.google.ru/books?id=3809k9YeOvwC
432. Parker H. (1909). Ancient Ceylon: An Account of the Aborigines and of Part of the Early Civilisation. Luzac and Co, Publishes to the India office // https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.69695/page/n633

433. Murray H. J. R. (1952). A history of board-games other than chess. Clarendon Press // https://books.google.ru/books?id=P2UNAQAAMAAJ
434. Bell R. C. (1969). Board and Table Games From Many Civilizations. Vol. I. 2nd ed. London, New York [etc.] Oxford U.P // https://archive.org/details/B-001–002–771/page/n127
435. Berger F. (2004). From circle and square to the image of the world: a possible interpretation for some petroglyphs of merels boards / Rock Art Research, Vol. 21, Iss. 1, pp. 11–25 // https://web.archive.org/web/20041121040028/http://mc2.vicnet.net.au/home/aura/shared_files/Berger1.pdf
436. Uberti M. (2012). The Merels Board Enigma. With the worldwide census. Marisa Uberti.
437. Berger F. (2004). From circle and square to the image of the world: a possible interpretation for some petroglyphs of merels boards / Rock Art Research, Vol. 21, Iss. 1, pp. 11–25 // https://web.archive.org/web/20041121040028/http://mc2.vicnet.net.au/home/aura/shared_files/Berger1.pdf
438. Berlekamp E. R., Conway J. H., Guy R. K. (1983). Winning ways for your mathematical plays: Games in particular. Acad. Pr // https://books.google.ru/books?id=1PfuAAAAMAAJ
439. Lanciani R. (1892). Gambling and Cheating in Ancient Rome / The North American Review, Volume 155 // https://archive.org/details/jstor-25102412/page/n1
440. Heimann F., Schädler U. (2014). The loop within circular three men's morris / Game Studies, Vol. 8, pp. 51–61 // https://www.researchgate.net/publication/312118169_The_loop_within_circular_three_men's_morris
441. Murray H. J. R. (2015). A History of Chess. Skyhorse Publishing // https://books.google.ru/books?id=dNSBCgAAQBAJ
442. Bell R. C. (2012). Board and Table Games from Many Civilizations. Dover Publications // https://books.google.ru/books?id=2vvBAgAAQBAJ
443. Стамова Т., Халтрин-Халтурина Е. (2011). Уильям Вордсворт. Прелюдия, или Становление сознания поэта. Фрагменты поэмы / Перевод Татьяны Стамовой. Вступление Елены Халтрин-Халтуриной / Иностранная литература. № 3 // http://magazines.russ.ru/inostran/2011/3/v09.html
444. Notes and Queries, 2nd Series Volume VI 152, Nov. 27 1858 // https://archive.org/details/notesqueries2621unse/page/434
445. Wikipedia contributors. (2020, November 6). Tic-tac-toe. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 02:40, November 12, 2020, from https://en.wikipedia.org/wiki/Tic-tac-toe
446. Monnens D. (2013). "I commenced an examination of a game called 'tit-tat-to'": Charles Babbage and the "First" Computer Game / DiGRA Conference 2013 // http://www.digra.org/wp-content/uploads/digital-library/paper_436.pdf
447. Bateman C. (2014). Meet Bertie the Brain, the world's first arcade game, built in Toronto / Spacing Toronto, August 13 // http://spacing.ca/toronto/2014/08/13/meet-bertie-brain-worlds-first-arcade-game-built-toronto/
448. Wolf M. J. P. (2012). Encyclopedia of Video Games: The Culture, Technology, and Art of Gaming. Greenwood Publishing Group // https://books.google.ru/books?id=deBFx7QAwsQC
449. Michie D. (1963). Experiments on the mechanization of game-learning // http://people.csail.mit.edu/brooks/idocs/matchbox.pdf
450. Brooks R. (2019). Interesting Stuff for Download / Rodney Brooks — Roboticist // http://people.csail.mit.edu/brooks/documents.html
451. Schwalbe U., Walker P. (1997, 1999). Zermelo and the Early History of Game Theory // http://abel.math.harvard.edu/~elkies/FS23j.03/zermelo.pdf
452. Aumann R. J. (1989). Game Theory / Eatwell J., Milgate M., Newman P. (1989). The New Palgrave: Game Theory, Macmillan Press, London.
453. Eichberger J. (1993). Game Theory for Economists, Academic Press, San Diego.
454. Hart S. (1992). Games in Extensive and Strategic Forms, in Robert J. Aumann and Sergiu Hart (eds.), Handbook of Game Theory, Volume 1, NorthHolland, Amsterdam.
455. Mas-Colell A., Whinston M. D., Green J. R. (1995). Microeconomic Theory, Oxford University Press, New York.
456. Dimand M. A., Dimand R. W. (1996). A History of Game Theory, Volume 1: From the Beginnings to 1945, Routledge, London.
457. Binmore K. (1992). Fun and Games: A Text on Game Theory, D. C. Heath and Company, Lexington
458. Zermelo E. (1913). Über eine Anwendung der Mengenlehre auf die Theorie des Schachspiels / Proceedings of the Fifth Congress Mathematicians (Cambridge, 1912), pp. 501–504 // https://doi.org/10.1007/978–3–540–79384–7_9
459. Kőnig D. (1927). Uber eine Schlussweise aus dem Endlichen ins Unendliche / Acta Scientiarum Mathematicarum, Vol. 3, pp. 121–130.

460. Kalmár L. (1928, 1929), Zur Theorie der abstrakten Spiele / Acta Scientiarum Mathematicarum, Vol. 4, pp. 65–85.
461. Dimand M. A., Dimand R. W. (1997). The Foundations of Game Theory, Volume I. Edward Elgar, Aldershot.
462. Schwalbe U., Walker P. (1997, 1999). Zermelo and the Early History of Game Theory // http://abel.math.harvard.edu/~elkies/FS23j.03/zermelo.pdf
463. Godden K. (2007). The Longest Possible Chess Game / Blog at Chess.com // https://www.chess.com/blog/kurtgodden/the-longest-possible-chess-game
464. von Neumann J., Morgenstern O. (1944). Theory of Games and Economic Behavior. Science Editions, J. Wiley // https://archive.org/details/game_theo_econ/page/n139
465. Israel G., Gasca A. M. (2009). The World as a Mathematical Game: John von Neumann and Twentieth Century Science. Birkhäuser Basel // https://books.google.at/books?id=6o52lsjG83UC
466. Leonard R. (2010). Von Neumann, Morgenstern, and the Creation of Game Theory: From Chess to Social Science, 1900–1960. Cambridge University Press // https://books.google.ru/books?id=uV-6sAwAAQBAJ
467. Aspray W. (1990). John Von Neumann and the Origins of Modern Computing. MIT Press // https://books.google.ru/books?id=M6DmngEACAAJ
468. Macrae N. (1992). John von Neumann: The Scientific Genius Who Pioneered the Modern Computer, Game Theory, Nuclear Deterrence, and Much More. Pantheon Press // https://books.google.ru/books?id=ratFAAAAYAAJ
469. Brown T. A. (1941). Elementary Inequalities. The Mathematical Gazette, Vol. 25, Iss. 263, pp. 2–11 // https://doi.org/10.2307/3606471
470. Bellman R. (1954). Inequalities / Mathematics Magazine, Vol. 28, Iss. 1, pp. 21–26 // https://doi.org/10.2307/3029433
471. Stiller L. B. (1995). Exploiting symmetry on parallel architectures. Ph. D. Thesis, Johns Hopkins University. Archived from the original on 30 September 2007. Retrieved 4 May 2007 // https://web.archive.org/web/20070930063855/http://users.rcn.com/lstiller/thesis.pdf
472. Bellman R. E. (1961). On the reduction of dimensionality for classes of dynamic programming processes. Technical report, The RAND Corporation, Santa Monica, CA, 7 March 1961 // https://www.rand.org/pubs/papers/P2243.html
473. Bellman R. E. (1965). On the application of dynamic programming to the determination of optimal play in chess and checkers. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 53(2):244–246, February // https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC219499/pdf/pnas00154–0020.pdf
474. Гик Е. Я. (1976). Математика на шахматной доске. — М.: Наука // https://books.google.ru/books?id=bPQPAQAAIAAJ
475. Брудно А., Ландау И. (1969). Неприкасаемый король // Шахматы. № 19.
476. Ströhlein T. (1970). Untersuchungen über kombinatorische Spiele. Technische Hochschule München // https://books.google.ru/books?id=VowgHAAACAAJ
477. Ströhlein T., Zagler L. (1977). Analyzing games by Boolean matrix iteration / Discrete Mathematics, Vol. 19, Iss. 2, pp. 183–193 // https://doi.org/10.1016/0012–365X(77)90033–4
478. Stiller L. B. (1995). Exploiting symmetry on parallel architectures. Ph. D. Thesis, Johns Hopkins University. Archived from the original on 30 September 2007. Retrieved 4 May 2007 // https://web.archive.org/web/20070930063855/http://users.rcn.com/lstiller/thesis.pdf
479. Комиссарчик Е. А., Футер А. Л. (1974). Об анализе ферзевого эндшпиля при помощи ЭВМ // Проблемы кибернетики. № 29.
480. Футер А. Л. (1978). Программирование малофигурных эндшпилей: Докл. АН СССР, 242:2 (1978). С. 302–305 // http://mi.mathnet.ru/dan41980
481. Александров А. Г., Бараев А. М., Гольфанд Я. Ю., Комиссарчик Э. А., Футер А. Л. (1977). Анализ ладейного эндшпиля на ЭВМ / Автоматика и телемеханика. № 8. С. 113–117 // http://mi.mathnet.ru/at7425
482. Levy D. (2007). Love and Sex with Robots: The Evolution of Human-Robot Relationships. Harper-Collins // https://books.google.ru/books?id=P-J4sAAAAYAAJ
483. https://www.in2013dollars.com/uk/inflation/1968?endYear=2023&amount=500
484. Baraniuk C. (2015). BBC — Future — The cyborg chess players that can't be beaten, December 04 // http://www.bbc.com/future/story/20151201-the-cyborg-chess-players-that-cant-be-beaten
485. Douglas J. R. (1978). Chess 4.7 versus David Levy / BYTE, p. 84. Retrieved 17 October 2013 // https://archive.org/stream/byte-magazine-1978–12/1978_12_BYTE_03–12_Life#page/n85/mode/2up

486. Levy D. N. L., Newborn M. (1980). More chess and computers: the microcomputer revolution, the challenge match. Computer Science Press // https://books.google.ru/books?id=uDtQAQAAIAAJ
487. Levy D. (1984). Chess Master versus Computer // ICCA Journal, Vol. 7, No. 2.
488. Levy D. (2013). Computer Chess Compendium. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=vwbkBwAAQBAJ
489. Levy D., Newborn M. (2012). All About Chess and Computers: Chess and Computers and More Chess and Computers. Springer Science & Business Media // https://books.google.ru/books?id=Ao6q-CAAAQBAJ
490. Mashey J. (2005). Oral History of Ken Thompson // http://archive.computerhistory.org/resources/text/Oral_History/Thompson_Ken/thompson.oral_history_transcript.2005.102657921.pdf
491. Bourzutschky M., Kryukov K. (2022). All about chess endgames study // https://www.arves.org/arves/index.php/en/endgamestudies/theory/endgame-tablebases-check-a-7-men-position?id=1509
492. Bourzutschky M., Kryukov K. (2022). All about chess endgames study // https://www.arves.org/arves/index.php/en/endgamestudies/theory/endgame-tablebases-check-a-7-men-position?id=1533
493. Hicks J. (1966). Close-up / Piet Hein bestrides art and science / LIFE, Oct. 14 // https://books.google.ru/books?id=lFYEAAAAMBAJ&pg=PA64
494. Варденга Г. Л. (1997). П. Хэйн. Груки / Вопросы истории естествознания и техники. № 3 // http://vivovoco.ibmh.msk.su/VV/PAPERS/BONMOTS/GROOKS/HEIN.HTM
495. Toft H. (2019). Hex, Inside and Out: The Full Story. CRC Press // https://doi.org/10.1201/9780429031960
496. Nash J. (1952). Rand Corp. technical report D-1164: Some Games and Machines for Playing Them // https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/documents/2015/D1164.pdf
497. Gale D. (1979). The Game of Hex and Brouwer Fixed-Point Theorem / The American Mathematical Monthly. Mathematical Association of America, Vol. 86, Iss. 10, pp. 818–827 // https://doi.org/10.2307/2320146
498. Nash J. (1952). Rand Corp. technical report D-1164: Some Games and Machines for Playing Them // https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/documents/2015/D1164.pdf
499. Woolley C. L. (1930). Ur of the Chaldees // https://books.google.ru/books?id=JBRHtd-ooiYC
500. Гомер. Одиссея // http://data.perseus.org/citations/urn: cts: greekLit: tlg0012.tlg002.perseus-grc1:1.80–1.124
501. Peck H. T. (1898). Harpers Dictionary of Classical Antiquities // http://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?doc=Perseus: text:1999.04.0062: id=latrunculi-harpers
502. Сократ. Федр // http://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?doc=urn: cts: greekLit: tlg0059.tlg012.perseus-grc1:274d http://psylib.org.ua/books/plato01/21fedr.htm
503. Westerveld G. (2013). The History of Alquerque-12. Spain and France. Volume I. Lulu.com // https://books.google.ru/books?id=BpopBgAAQBAJ
504. Neto J. P. (2016). Latrunculi / The World of Abstract Games // https://www.di.fc.ul.pt/~jpn/gv/latrunculi.htm
505. Цит. по: Schaeffer J. (2013). One Jump Ahead: Challenging Human Supremacy in Checkers. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=HKfqBwAAQBAJ
506. Epstein R., Roberts G., Beber G. (2007). Parsing the Turing Test: Philosophical and Methodological Issues in the Quest for the Thinking Computer. Springer Netherlands // https://books.google.ru/books?id=aggUJL_5_0QC
507. Turing A. M. (2000). Alan Turing's Manual for the Ferranti Mk. I. Transcribed by Robert S. Thau // http://curation.cs.manchester.ac.uk/computer50/www.computer50.org/kgill/mark1/RobertTau/turing.pdf
508. Doornbusch P. (2017). MuSA 2017 Conference — Early Computer Music Experiments in Australia, England and the USA // https://www.researchgate.net/publication/319130809_MuSA_2017_Conference_-_Early_Computer_Music_Experiments_in_Australia_England_and_the_USA
509. https://soundcloud.com/musicandcomputerscience/ferranti-mark-1-computer-god-save-the-queen-baa-baa-black-sheep-in-the-mood/s-NKOm6
510. Doornbusch P. (2004). Computer Sound Synthesis in 1951: The Music of CSIRAC / Computer Music Journal, Vol. 28 // https://www.mitpressjournals.org/doi/10.1162/014892604322970616
511. Barron D. (2008). Pioneer Profiles — Christopher Strachey / RESURRECTION: The Bulletin of the Computer Conservation Society, Vol. 43 // http://www.cs.man.ac.uk/CCS/res/res43.htm
512. Peter Norvig (2012). Systems Analysis and Programming: Thoughts from the Attic / eter@Norvig.com // http://norvig.com/sciam/sciam.html

513. Schaeffer J. (2013). One Jump Ahead: Challenging Human Supremacy in Checkers. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=HKfqBwAAQBAJ
514. Turing A. M. (2000). Alan Turing's Manual for the Ferranti Mk. I. Transcribed by Robert S. Thau // http://curation.cs.manchester.ac.uk/computer50/www.computer50.org/kgill/mark1/RobertTau/turing.pdf
515. J. C. Bik A. (2012). Computing Deep Perft and Divide Numbers for Checkers. ICGA Journal, 35, 206–213 // https://doi.org/10.3233/ICG-2012–35403
516. Samuel A. L. (1967). Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers. II-Recent Progress / IBM Journal, November 1967 // https://researcher.watson.ibm.com/researcher/files/us-beygel/samuel-checkers.pdf
517. von Neumann J. (1928). Zur Theorie der Gesellschaftsspiele / Mathematische Annalen, Vol. 100, Iss. 1, pp. 295–320 // https://doi.org/10.1007/BF01448847
518. van den Herik H. J. (1983). Computerschaak, schaakwereld en kunstmatige intelligentie. Herik // https://books.google.ru/books?id=5HcWAAAACAAJ
519. Beal D. (1999). The Nature of MINIMAX Search. Ph. D. thesis // https://project.dke.maastrichtuniversity.nl/games/files/phd/Beal_thesis.pdf
520. Wiener N. (1948). Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine — MIT Press, Cambridge, MA // https://books.google.ru/books?id=NnM-uISyywAC
521. Epstein R., Roberts G., Beber G. (2007). Parsing the Turing Test: Philosophical and Methodological Issues in the Quest for the Thinking Computer. Springer Netherlands // https://books.google.ru/books?id=aggUJL_5_oQC
522. Sampson J. R. (2012). Adaptive Information Processing: An Introductory Survey. Springer Science & Business Media // https://books.google.ru/books?id=OsaqCAAAQBAJ
523. Samuel A. L. (1967). Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers. II-Recent Progress / IBM Journal, November 1967 // https://researcher.watson.ibm.com/researcher/files/us-beygel/samuel-checkers.pdf
524. Knuth D. E., Moore R. W. (1974). An Analysis of Alpha-Beta Pruning / Artificial Intelligence, Vol. 6, pp. 293–326 // https://pdfs.semanticscholar.org/dce2/6118156e5bc287bca2465a62e75af39c7e85.pdf
525. Samuel A. L. (1967). Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers. II-Recent Progress / IBM Journal, November 1967 // https://researcher.watson.ibm.com/researcher/files/us-beygel/samuel-checkers.pdf
526. Fogel D. B. (2001). Blondie24: Playing at the Edge of AI // https://books.google.ru/books?id=M9qLGRPkOVsC
527. Schaeffer J. (2013). One Jump Ahead: Challenging Human Supremacy in Checkers. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=HKfqBwAAQBAJ
528. Feigenbaum E. A., Feldman J. (1963). Computers and thought. McGraw-Hill // https://books.google.ru/books?id=OfT9tQEACAAJ
529. Kosharsky R. (1980). Robert Nealey, world blind checker champ / St. Petersburg Times, February 26th, 1980 // https://news.google.com/newspapers?nid=888&dat=19800226&id=GRsmAAAAIBAJ&sjid=dloDAAAAIBAJ&pg=6459,2508946&hl=ru
530. Эрик Дженсен, личные коммуникации.
531. World War I Soldier / Stuck Record (2021) / MontyPython.net // https://montycasinos.com/montypython/scripts/ww1soldier.php.html
532. Reilly E. D. (2003). Milestones in Computer Science and Information Technology. Greenwood Press // https://books.google.ru/books?id=JTYPKxug49IC
533. Gardner M. (2007). The Last Recreations: Hydras, Eggs, and Other Mathematical Mystifications. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=RHCkV2YaGoEC
534. https://www.in2013dollars.com/us/inflation/1977?endYear=2023&amount=5000
535. Schaeffer J. (2013). One Jump Ahead: Challenging Human Supremacy in Checkers. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=HKfqBwAAQBAJ
536. Schaeffer J. (2013). One Jump Ahead: Challenging Human Supremacy in Checkers. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=HKfqBwAAQBAJ
537. Schaeffer J. (2013). One Jump Ahead: Challenging Human Supremacy in Checkers. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=HKfqBwAAQBAJ
538. Shuffett R. L. (1982). Checkers, the Tinsley Way: Featuring the Checker Games of the World's Greatest Player, Dr. Marion F. Tinsley. R. L. Shuffett // https://books.google.ru/books?id=LHOxHAAACAAJ
539. Schaeffer J. (2013). One Jump Ahead: Challenging Human Supremacy in Checkers. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=HKfqBwAAQBAJ
540. Schaeffer J. (2013). One Jump Ahead: Challenging Human Supremacy in Checkers. Springer New

York // https://books.google.ru/books?id=HKfqBwAAQBAJ
541. 1st Computer Olympiad, Checkers / ICGA Tournaments. Tournaments between computer programs: chess, draughts, checkers, Go, backgammon, and more // https://www.game-ai-forum.org/icga-tournaments/tournament.php?id=126
542. Millett A. (1994). Derek Oldbury: A Eulogy / Journal of the International Computer Chess Association, 17, Vol. 3, pp. 174–175 // https://content.iospress.com/download/icga-journal/icg17–3–14?id=icga-journal%2Ficg17–3–14
543. 2nd Computer Olympiad, Checkers / ICGA Tournaments. Tournaments between computer programs: chess, draughts, checkers, Go, backgammon, and more // https://www.game-ai-forum.org/icga-tournaments/tournament.php?id=136
544. Schaeffer J. (2013). One Jump Ahead: Challenging Human Supremacy in Checkers. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=HKfqBwAAQBAJ
545. 1st Computer Olympiad, Checkers / ICGA Tournaments. Tournaments between computer programs: chess, draughts, checkers, Go, backgammon, and more // https://www.game-ai-forum.org/icga-tournaments/tournament.php?id=126
546. Schaeffer J. (2013). One Jump Ahead: Challenging Human Supremacy in Checkers. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=HKfqBwAAQBAJ
547. Mephisto (Computer) vs Deep Thought (Computer). 20th NACCC (1989), Reno, NV USA, rd 5, Nov-15. Queen's Gambit Accepted: Janowski-Larsen Variation (D25). 1–0 / chessgames.com: online chess database and community // http://www.chessgames.com/perl/chessgame?gid=1472135
548. Mephisto Portorose / Chess Programming Wiki // https://www.chessprogramming.org/Mephisto_Portorose
549. 1990 3-Move Nationals Location: Tupelo, Mississippi / The American Checker Federation // https://www.usacheckers.com/nats1990.php
550. Schaeffer J. (2013). One Jump Ahead: Challenging Human Supremacy in Checkers. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=HKfqBwAAQBAJ
551. Knuth D. (1990). Arthur Lee Samuel, 1901–1990 / TUGboat, Volume 11, No. 4 // https://tug.org/TUGboat/tb11–4/tb30knut-samuel.pdf
552. Propp J. (1999). Chinook (a report on the 1994 Man-Machine World Checkers Championship) // http://faculty.uml.edu/jpropp/chinook.html
553. Kucharski A. (2016). The Perfect Bet: How Science and Math Are Taking the Luck Out of Gambling. Basic Books // https://books.google.ru/books?id=abBVDgAAQBAJ
554. Schaeffer J. (2008). One Jump Ahead: Computer Perfection at Checkers. Springer US // https://books.google.ru/books?id=IVumOsLLqgAC
555. Schaeffer J. (2008). One Jump Ahead: Computer Perfection at Checkers. Springer US // https://books.google.ru/books?id=IVumOsLLqgAC
556. Schaeffer J. (2008). One Jump Ahead: Computer Perfection at Checkers. Springer US // https://books.google.ru/books?id=IVumOsLLqgAC
557. 1994 3-Move Nationals Location: Garland, Texas / The American Checker Federation // https://www.usacheckers.com/nats1994.php
558. Schaeffer J. (2008). One Jump Ahead: Computer Perfection at Checkers. Springer US // https://books.google.ru/books?id=IVumOsLLqgAC
559. 1996 3-Move Nationals Location: Danville, Virginia / The American Checker Federation // https://www.usacheckers.com/nats1996.php
560. Schaeffer J. (2008). One Jump Ahead: Computer Perfection at Checkers. Springer US // https://books.google.ru/books?id=IVumOsLLqgAC
561. Westerveld G. (2013). The History of Checkers (Draughts). Lulu.com // https://books.google.ru/books?id=wwotBgAAQBAJ
562. Sturges J. (1800). Guide to the Game of Draughts: Containing Five Hundred Select Games, Together with One Hundred and Forty Striking Situations, Exhibiting Games Drawn, and Won, by Critical Strokes; Comprising Almost Every Possible Variety which the Board Can Display… // https://books.google.ru/books?id=jmR2ugEACAAJ
563. Dunn A. (1998). The Ontology of Checkers / The New York Times, February 25, 1998 // http://movies2.nytimes.com/library/cyber/surf/022598mind.html
564. Grayson B. (2007). The Next Jump in Artificial Intelligence: Computer program is unbeatable at checkers / Dicsover, July 19 // https://www.discovermagazine.com/technology/the-next-jump-in-artificial-intelligence
565. Blanvillain X. A. P. (2012). Oware: The Oldest Game of the World Will Not Be Solved by Computers // https://www.slideshare.net/XavierBlanvillain/abstract-oware-solutionxavierblanvillain120226
566. Romein J. W., Bal H. E. (2002). Awari is solved / ICGA Journal, Vol. 25, Iss. 3 // https://icga.org/icga/journal/contents/content25–3.htm#AWARI%20IS%20SOLVED

567. Schaeffer J., Bjornsson Y., Burch N., Lake R., Lu P., Sutphen S. (2003). Building the Checkers 10-piece Endgame Databases / Advances in Computer Games 10, Kluwer Academic Publishers, pp. 193–210 // https://www.researchgate.net/publication/220717027_Building_the_Checkers_10-Piece_Endgame_Databases
568. Bjornsson Y., Schaeffer J., Sturtevant N. (2005). Partial Information Endgame Databases / Advances in Computer Games 11, Lecture Notes in Computing Science #4250, Springer-Verlag, 2005, pp. 11–22 // https://www.researchgate.net/publication/220716997_Partial_Information_Endgame_Databases
569. Schaeffer J. (2008). One Jump Ahead: Computer Perfection at Checkers. Springer US // https://books.google.ru/books?id=IVumOsLLqgAC
570. Schaeffer J., Burch N., Björnsson Y., Kishimoto A., Müller M., Lake R., Lu P., Sutphen S. (2007). Checkers Is Solved / Science, Vol. 317 (5844), pp. 1518–1522 // https://doi.org/10.1126/science.1144079
571. The Scientist News Staff (2007). The Runners-Up / Science, Vol. 318, Iss. 5858, pp. 1844–1849 // https://science.sciencemag.org/content/318/5858/1844.1.full
572. Schaeffer J., Burch N., Björnsson Y., Kishimoto A., Müller M., Lake R., Lu P., Sutphen S. (2007). Checkers Is Solved / Science, Vol. 317 (5844), pp. 1518–1522 // https://doi.org/10.1126/science.1144079
573. Шахматы: энциклопедический словарь / гл. ред. А. Е. Карпов. — М.: Советская энциклопедия, 1990. С. 8–9 // http://whychess.ru/835encuklopedicheskiy-slovar.html
574. von Windisch K. G. (1783). Briefe über den schachspieler des herrn von Kempelen. A. Löwe // https://books.google.ru/books?id=vS4VAAAAYAAJ
575. http://www.historicalstatistics.org/Currencyconverter.html
576. Wilson J. G., Fiske J. (1900). Maelzl, John Nepomuk. Appletons' Cyclopædia of American Biography. New York: D. Appleton // https://archive.org/details/appletonscyclopa04wils/page/170
577. Joseph Earl Arrington (1960). John Maelzel, Master Showman of Automata and Panoramas / Pennsylvania Magazine of History and Biography, vol. 84, issue 1, January // https://journals.psu.edu/pmhb/article/view/41542
578. Standage T. (2003). The Turk: The Life and Times of the Famous Eighteenth-Century Chess-Playing Machine. Berkley Books // https://books.google.ru/books?id=bITZAAAAMAAJ
579. Hunneman W., Hunnemann W. (1820). Chess: A Selection of Fifty Games from Those Played by the Automaton Chess Player, During Its Exhibition in London in 1820: Taken Down, by Permission of Mr. Maelzel, at the Time They Were Played. Sold at the exhibition room, no 29, St. James's Street; and by A. Maxwell, Bell Yard, Lincolns Inn // https://books.google.ru/books?id=iP5dAAAAcAAJ
580. Le Magasin picturesque edited by E. Charton, (1834) p. 155 // https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=chi.12785572; view=1up; seq=165
581. Walker G. (1850). Chess & Chess-Players: Consisting of Original Stories and Sketches: By George Walker. Charles J. Skeet // https://books.google.ru/books?id=MfUIAAAAQAAJ
582. Willis R. (1821). An Attempt to Analyse the Automaton Chess Player, of Mr. de Kempelen ... to which is Added, a ... Collection of the Knight's Moves Over the Chess Board. Booth // https://books.google.ru/books?id=N7kUAAAAYAAJ
583. Silas W. M. (1857). The Last of a Veteran Chess Player / The Chess Monthly. No. 1–2 // https://www.chess.com/blog/batgirl/the-last-of-a-veteran-chess-player—-the-turk
584. Шахматы: энциклопедический словарь / гл. ред. А. Е. Карпов. — М.: Советская энциклопедия // http://whychess.ru/835encuklopedicheskiy-slovar.html
585. Robert-Houdin J., Wraxall F. (1859). Memoirs of Robert-Houdin, written by himself[tr. by sir F. C. L. Wraxall. Copyright ed. Oxford University Press // https://books.google.ru/books?id=ZjkBAAAAQAAJ
586. Funaro L. E. (2012). Morosi, Giuseppe / Dizionario Biografico degli Italiani, Vol. 77 // http://www.treccani.it/enciclopedia/giuseppe-morosi_(Dizionario-Biografico)/
587. Croft L. (2012). George Anton Schaeffer: Killing Napoleon From The Air. Sphynx Publications // https://books.google.ru/books?id=oz5enQEACAAJ
588. Шахматы: энциклопедический словарь / гл. ред. А. Е. Карпов. — М.: Советская энциклопедия // http://whychess.ru/835encuklopedicheskiy-slovar.html
589. Hobbes T. (1969). Leviathan, 1651. Scolar P // https://books.google.ru/books?id=8xyDAAAAMAAJ
590. Lee J. A. N. (1995, 2013). Leonardo Torres y Quevedo / IEEE Compputer Society: Computer Pioneers by J. A. N. Lee // https://history.computer.org/pioneers/torres.html
591. Dalakov G. Leonardo Torres's chess-machine / History of Computers: hardware, software, inter-

net… // https://history-computer.com/Dreamers/Torres_chess.html
592. Williams A. (2017). History of Digital Games: Developments in Art, Design and Interaction. CRC Press // https://books.google.ru/books?id=xLVdDgAAQBAJ
593. Bowden B. (1953). Faster than thought: a symposium on digital computing machines. Pitman // https://books.google.ru/books?id=5HZQAAAAMAAJ
594. Torres and his Remarkable Automatic Devices: He Would Substitute Machinery for the Human Mind / Scientific American Supplement, No. 2079 (November, 1915) // http://doi.org/10.1038%2Fscientificamerican11061915–296supp
595. Williams A. (2017). History of Digital Games: Developments in Art, Design and Interaction. CRC Press // https://books.google.ru/books?id=xLVdDgAAQBAJ
596. Dalakov G. Leonardo Torres's chess-machine / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/Dreamers/Torres_chess.html
597. Museo "Torres Quevedo" / Universidad Politécnica de Madrid // http://www.upm.es/UPM/MuseosUPM/MuseoTorresQuevedo
598. Mccain N. (2016). Light on forlorn ropeway / news24.com, 01 Mar 2016 // https://www.news24.com/news24/SouthAfrica/Local/Peoples-Post/light-on-forlorn-ropeway-20160229
599. Levy D. (2005). Robots Unlimited: Life in a Virtual Age. CRC Press // https://books.google.ru/books?id=tiesCQAAQBAJ
600. Francisco González de Posada (2007). Leonardo Torres Quevedo Y La Conquista Del Aire. Centenario De La Botadura Del Dirigible Torres Quevedo 1907. Guadalajara 2007 // https://www.torresquevedo.org/LTQ10/images/LTQConquistaDelAire.pdf
601. Dalakov G. Leonardo Torres y Quevedo / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/People/TorresBio.html
602. Yuste A. P. Palma M. S. (2005). Scanning our Past from Madrid: Leonardo Torres Quevedo. Proceedings of the IEEE 93 (v. 1), pp. 1379–1382 // https://ieeexplore.ieee.org/document/1461596
603. Dalakov G. Leonardo Torres y Quevedo / History of Computers: hardware, software, internet… // https://history-computer.com/Babbage/LeonardoTorres.html
604. Turing A. M. (1945). Proposed electronic calculator // http://www.alanturing.net/proposed_electronic_calculator/
605. Turing A. M. (1948). Intelligent machinery: a report // http://www.alanturing.net/intelligent_machinery/
606. Copeland J., Bowen J., Sprevak M., Wilson R. (2017). The Turing Guide. OUP Oxford // https://books.google.ru/books?id=y1MjDgAAQBAJ
607. Copeland J., Bowen J., Sprevak M., Wilson R. (2017). The Turing Guide. OUP Oxford // https://books.google.ru/books?id=y1MjDgAAQBAJ
608. Pritchard E. (1980). Origins of computer chess / Personal Computing 1980–01 // https://archive.org/details/198001/page/n79
609. Bowden B. (1953). Faster than thought: a symposium on digital computing machines. Pitman // https://books.google.ru/books?id=5HZQAAAAMAAJ
610. Turing A. (1953). Digital computers applied to games. Turing's contribution to "Faster than thought", ed. B. V. Bowden, London 1953. Published by Pitman Publishing. TS with MS corrections. R.S. 1953b / The Turing digital archive // https://turingarchive.kings.cam.ac.uk/publications-lectures-and-talks-amtb/amt-b-7
611. Friedel F. (2017). Reconstructing Turing's "Paper Machine" // https://en.chessbase.com/post/reconstructing-turing-s-paper-machine
612. Bauer F. L., Wössner H. (1972). The "Plankalkül" of Konrad Zuse: A Forerunner of Today's Programming Languages. Commun. ACM 15(7), pp. 678–685.
613. Zuse K., Bauer F. L., McKenna P., Ross J. A., Zemanek H. (1993). The Computer — My Life. Springer // https://books.google.ru/books?id=Ro-5JOskbChAC
614. Shannon C. E. (1950). Programming a Computer for Playing Chess / Philosophical Magazine, Ser. 7, Vol. 41, No. 314 // https://vision.unipv.it/IA1/aa2009–2010/ProgrammingaComputerforPlayingChess.pdf
615. Copeland J., Bowen J., Sprevak M., Wilson R. (2017). The Turing Guide. OUP Oxford // https://books.google.ru/books?id=y1MjDgAAQBAJ
616. Schliebs G. (1953). Über die Gründzuge eines Programms für eine Schachspielende Rechenmaschine / Funk und Ton, 1953, Bd. 7, S. 257–265.
617. Китов А. И. (1956). Электронные цифровые машины // http://www.kitov-anatoly.ru/naucnye-trudy/izbrannye-naucnye-trudy-anatolia-ivanovica-v-pdf/elektronnye-cifrovye-masiny
618. Китов А. И., Криницкий Н. А. (1958). Электронные вычислительные машины и программирование // http://elib.ict.nsc.ru/jspui/bitstream/ICT/862/3/kitov1958.pdf
619. Безбородов Ю. М., Орлов Б. В. (1961). Машина играет в шахматы / Математическое просвещение. Вып. 6. С. 139–164 // http://mi.mathnet.ru/mp682

620. Лаут В. Н. Как я попал в ИТМ? // http://www.ipmce.ru/about/history/leading/lebedev/remembrance/laut/print/
621. McCorduck P. (2004). Machines who think: a personal inquiry into the history and prospects of artificial intelligence. A. K. Peters // https://books.google.ru/books?id=aH9QAAAAMAAJ
622. Ensmenger N. (2012). The Computer Boys Take Over: Computers, Programmers, and the Politics of Technical Expertise. New York, NY, USA: MIT Press // https://books.google.ru/books?id=VCcsTPQ7380C
623. Misa T. (2011). Gender Codes.: Why Women Are Leaving Computing. Wiley // https://books.google.ru/books?id=EjDYh_KHls8C
624. Mazliak L., Perfettini T. (2019). Under the protection of alien wings. Mathematicians in the Russian emigration in inter war France // https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02280296/document
625. Элизабет Рэнд, личные коммуникации.
626. Макс Бернстайн, личные коммуникации.
627. McCorduck P. (2004). Machines who think: a personal inquiry into the history and prospects of artificial intelligence. A. K. Peters // https://books.google.ru/books?id=aH9QAAAAMAAJ
628. Bernstein A., Van Roberts R. (1958). Computer V. Chess player / Scientific American, 198, pp. 96–105.
629. Müller K., Schaeffer J. (2018). Man Vs. Machine: Challenging Human Supremacy at Chess. New York, NY, USA: Russell Enterprises, Incorporated // https://books.google.ru/books?id=0GV2DwAAQBAJ
630. Logan A., Gill B. (1958). Runner-up / The New Yorker, November 29, p. 43 // https://www.newyorker.com/magazine/1958/11/29/runner-up-4
631. Solomonof G. (2006). Ray Solomonoff and the Dartmouth Summer Research Project in Artificial Intelligence, 1956 // http://raysolomonoff.com/dartmouth/dartray.pdf
632. McCorduck P. (2004). Machines who think: a personal inquiry into the history and prospects of artificial intelligence. A. K. Peters // https://books.google.ru/books?id=aH9QAAAAMAAJ
633. McCarthy J. (2006). The Dartmouth Workshop — as planned and as it happened // http://www-formal.stanford.edu/jmc/slides/dartmouth/dartmouth/node1.html
634. Logan A., Gill B. (1958). Runner-up / The New Yorker, November 29, p. 43 // https://www.newyorker.com/magazine/1958/11/29/runner-up-4
635. McCorduck P. (2004). Machines who think: a personal inquiry into the history and prospects of artificial intelligence. A. K. Peters // https://books.google.ru/books?id=aH9QAAAAMAAJ
636. Википедия // https://ru.wikipedia.org/wiki/Понедельник_начинается_в_субботу (версия от 29.05.2019).
637. OFF-LINE интервью с Борисом Стругацким. Сентябрь 2009 / Аркадий и Борис Стругацкие: официальный сайт // http://www.rusf.ru/abs/int0132.htm
638. Глушкова А., Жабин С. (2019). Виртуальная страна Кибертония — субкультура советских программистов / Спильне. 8 апреля // https://commons.com.ua/uk/virtualnaya-strana-kibertoniya/
639. Игорь Осипчук (2013). Дочь академика Глушкова: «Прочтя 20 страниц математического текста, отец запоминал его наизусть» / Факты // https://fakty.ua/169041-prochtya-20-stranic-matematicheskogo-teksta-otec-zapominal-ego-naizust
640. Глушкова А., Жабин С. (2019). Виртуальная страна Кибертония — субкультура советских программистов / Спильне. 8 апреля // https://commons.com.ua/uk/virtualnaya-strana-kibertoniya/
641. Волошин А. (1965). Кибертония-65 / Вечерний Киев. Суббота 16 янв. С. 2 // http://ogas.kiev.ua/library/kybertonyya-65–694
642. Глушкова А., Жабин С. (2019). Виртуальная страна Кибертония — субкультура советских программистов / Спильне. 8 апреля // https://commons.com.ua/uk/virtualnaya-strana-kibertoniya/
643. Игорь Осипчук (2013). Дочь академика Глушкова: «Прочтя 20 страниц математического текста, отец запоминал его наизусть» / Факты // https://fakty.ua/169041-prochtya-20-stranic-matematicheskogo-teksta-otec-zapominal-ego-naizust
644. Глушкова А., Жабин С. (2019). Виртуальная страна Кибертония — субкультура советских программистов / Спильне. 8 апреля // https://commons.com.ua/uk/virtualnaya-strana-kibertoniya/
645. Смилга В. П. (1956). Возможен ли шахматный автомат? / Шахматы в СССР. № 6.
646. Смилга В. П. (1963). Электронный гроссмейстер / Знание — сила. № 12.
647. Евграфов М. А., Задыхайло И. Б. (1965). Некоторые соображения о программировании шахматной игры / Проблемы кибернетики. № 15.

648. Туманов В. «„Лучший ход“ — за 58 секунд» // Таль — Ботвинник: матч-реванш на первенство мира. Бюллетень Центрального шахматного клуба СССР. 1961. № 8. С. 4–5.
649. Ландис Е. М., Яглом И. М. (2001). Об Александре Семёновиче Кронроде / Успехи математических наук. Т. 56. Вып. 5 (341). С. 191–201 // https://doi.org/10.4213/rm448
650. Гутер Р. С., Полунов Ю. Л. (1981). От абака до компьютера / Изд. 2-е, испр. и доп. — М.: Знание // http://elib.ict.nsc.ru/jspui/bitstream/ICT/1354/4/abacus_1981b.pdf
651. Ландис Е. М., Яглом И. М. (2001). Об Александре Семёновиче Кронроде / Успехи математических наук. Т. 56. Вып. 5 (341). С. 191–201 // https://doi.org/10.4213/rm448
652. Академия наук СССР, Трапезников В. А., Национальный комитет СССР по автоматическому управлению (1967). Оптимальные системы, статистические методы: труды III Всесоюзного совещания по автоматическому управлению (технической кибернетике), Одесса, 20–26 сентября 1965 г. Наука // https://books.google.ru/books?id=S_fmAAAAMAAJ
653. Nelson W. L. (2011). 1965 USSR Trip / MYBELLLABSDAYS // https://mybelllabsdays.wordpress.com/2011/12/04/1965-ussr-trip/
654. Маккарти Д. (2006). Вспоминая Андрея Петровича Ершова / Андрей Петрович Ершов — учёный и человек / под ред. А. Г. Марчука. — Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН // https://www.iis.nsk.su/files/book/file/Ershov_kniga.pdf
655. Маккарти Д. (1965). Письмо Андрею Ершову / Архив академика А. П. Ершова // http://ershov.iis.nsk.su/node/777848
656. Маккарти Д. (2006). Вспоминая Андрея Петровича Ершова / Андрей Петрович Ершов — учёный и человек / под ред. А. Г. Марчука. — Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН // https://www.iis.nsk.su/files/book/file/Ershov_kniga.pdf
657. McCarthy J. (2005). The History of Computer Chess: An AI Perspective (Video). Mountain View, CA, USA: Computer History Museum // https://www.youtube.com/watch?v=AvU_fnLWRRk
658. Кронрод А. С. (2004) Беседы о программировании / Предисл. Л. А. Кронрод. Послесл. В. Л. Арлазарова. Изд. 2-е, стереотипное. — М.: Едиториал УРСС // https://nsu.ru/xmlui/handle/nsu/9050
659. http://greko.su/m20-itef.pdf
660. Рузайкин Г. И., Коновалов С. П. (2005). Рассказ «бабки-повитухи» / Мир ПК. № 10 // https://www.osp.ru/pcworld/2005/10/317270/
661. Адельсон-Вельский Г. М., Арлазаров В. Л., Битман А. Р., Животовский А. А., Усков А. В. (1970). О программировании игры вычислительной машины в шахматы / Успехи математических наук. Т. 25. Вып. 2 (152). С. 221–260 // http://mi.mathnet.ru/umn5324
662. Гутер Р. С., Арлазаров В. Л., Усков А. В. (1965). Практика программирования: Справочник. — М.: Наука.
663. Ершов А. П., Лавров С. С., Семендяев К. А. (1966). Письмо в «Литературную газету» / Архив академика А. П. Ершова // http://ershov.iis.nsk.su/node/806835
664. Гутер Р. С., Арлазаров В. Л., Усков А. В. (1965). Практика программирования: Справочник. — М.: Наука.
665. Костинский А. (2002). Компьютерные программы как конец спортивных шахмат / Радио Свобода // https://www.svoboda.org/a/24203756.html
666. Berenyi I. (1970). Computers in Eastern Europe / Scientific American, Vol. 223, Iss. 4.
667. Малиновский Б. Н. (1995). История вычислительной техники в лицах. — Киев: фирма «КИТ», ПТОО «А.С.К.» // http://lib.ru/MEMUARY/MALINOWSKIJ/o.txt
668. Донской М. История «Каиссы» / Виртуальный компьютерный музей // http://www.computer-museum.ru/games/kaissa1.htm
669. Chess: Ancient precursors and related games / Encyclopædia Britannica. 2002 // https://www.britannica.com/topic/chess
670. Chalmers A., Johnson S. (1810). The Works of the English Poets, from Chaucer to Cowper: Including the Series Edited with Prefaces, Biographical and Critical. J. Johnson // https://books.google.ru/books?id=boLVAAAAMAAJ
671. Murray H. J. R. (2015). A History of Chess. Skyhorse Publishing // https://books.google.ru/books?id=dNSBCgAAQBAJ
672. Донской М. История «Каиссы» / Виртуальный компьютерный музей // http://www.computer-museum.ru/games/kaissa1.htm
673. Müller K., Schaeffer J. (2018). Man Vs. Machine: Challenging Human Supremacy at Chess. New York, NY, USA: Russell Enterprises, Incorporated // https://books.google.ru/books?id=0G-V2DwAAQBAJ

674. Донской М. История «Каиссы» / Виртуальный компьютерный музей // http://www.computer-museum.ru/games/kaissa1.htm
675. Wall B. Kaissa // http://billwall.phpwebhosting.com/articles/Kaissa.htm
676. Владимир Арлазаров: Персона дня — 19.10.2018 / Российская шахматная федерация // https://ruchess.ru/persons_of_day/vladimir_arlazarov_pd/?sphrase_id=180658
677. Computer chess pioneer Mikhail Donskoy passes on // https://en.chessbase.com/post/computer-chepioneer-mikhail-donskoy-paes-on
678. 3rd World Computer Chess Championship / ICGA Tournaments: Tournaments between computer programs: chess, draughts, checkers, Go, backgammon, and more // https://www.game-ai-forum.org/icga-tournaments/tournament.php?id=68
679. Reseña histórica del ajedrez por computadora (VI) // http://www.anacadigital.com/historia/anaca5_1_89.htm
680. Horváth Z. (1990). Report on the 2nd Computer Olympiad. ICCA Journal, Vol. 13, No. 3.
681. 2nd Computer Olympiad, Chess / ICGA Tournaments: Tournaments between computer programs: chess, draughts, checkers, Go, backgammon, and more // https://www.game-ai-forum.org/icga-tournaments/tournament.php?id=142
682. Костинский А. (2002). Компьютерные программы как конец спортивных шахмат / Радио Свобода // https://www.svoboda.org/a/24203756.html
683. Арлазаров В. Л., Битман А. Р. (1968). Обыграет ли машина человека? / Шахматы в СССР. № 2. С. 9–11.
684. Адельсон-Вельский Г. М., Арлазаров В. Л., Битман А. Р., Животовский А. А., Усков А. В. (1969). О программировании шахматной игры / Труды первой зимней школы по математическому программированию. Вып. II. С. 216–252.
685. Адельсон-Вельский Г. М., Арлазаров В. Л., Битман А. Р., Животовский А. А., Усков А. В. (1970). О программировании игры вычислительной машины в шахматы / Успехи математических наук. Т. 25. Вып. 2 (152). С. 221–260 // http://www.mathnet.ru/links/e353ff456f77590009af6ba9f008f4cb/rm5324.pdf
686. Adelson-Velsky G., Arlazarov V., Donskoy M. (1975). Some Methods of Controlling the Tree Search in Chess Programs. Artificial Ingelligence, Vol. 6, No. 4, pp. 361–371.
687. Adelson-Velsky G., Arlazarov V., Donskoy M. (1977). On the Structure of an Important Class of Exhaustive Problems and Methods of Search Reduction for them. Advances in Computer Chess 1
688. Адельсон-Вельский Г. М., Арлазаров В. Л., Битман А. Р., Донской М. В. (1983). Машина играет в шахматы. — М.: Наука // http://www.computer-museum.ru/books/kaissa.pdf
689. Haugeland J. (1985). Symbolic Computation. Artificial Intelligence: The Very Idea. MIT Press // https://books.google.ru/books?id=UuQbnAEACAAJ
690. Turing A. (1953). Digital computers applied to games.n.d. Turing's contribution to "Faster than thought", ed. B. V. Bowden, London 1953. Published by Pitman Publishing. TS with MS corrections. R.S. 1953b / The Turing digital archive // http://www.turingarchive.org/viewer/?id=461&title=1
691. Carrera P., Cherubino G., Tortelli M., Rossi G. d., Romano G. (1617). Il gioco de gli scacchi di D. Pietro Carrera diuiso in otto libri, ne' quali s'insegnano i precetti, le vscite, e i tratti posticci del gioco, e si discorre della vera origine di esso. Con due discorsi, l'vno del padre D. Gio. Battista Chèrubino, l'altro del dottor Mario Tortelli, opera non meno vtile a' professori del gioco, che diletteuole a' gli studiosi per la varieta' della eruditione cauata dalle tenebre dell'antichita'. per Giouanni de' Rossi da Trento // https://books.google.ru/books?id=RPvGROWRIikC
692. Lolli G. (1763). Osservazioni teorico-pratiche sopra il giuoco degli scacchi ossia il Giuoco degli Scacchi: esposto nel sus miglian lume. Stamp. di S. Tommaso d'Aquino // https://books.google.ru/books?id=zych5drFRuQC
693. Ботвинник М. (1979). От шахматиста — к машине. — М.: Физкультура и спорт // https://books.google.ru/books?id=W8aptgEACAAJ
694. Phony Benoni. Wageningen Caltex (1958) / Chessgames.com: online chess database and community // http://www.chessgames.com/perl/chesscollection?cid=1026124
695. Мюннингхофф А. (1979). Макс Эйве / Пер. с нидерландского В. И. Мурахвери. — М.: Физкультура и спорт.
696. O'Connor J. J., Robertson E. F. (2003). Machgielis Euwe. School of Mathematics and Statistics University of St Andrews // http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/history/Biographies/Euwe.html
697. Ботвинник М. (1979). От шахматиста — к машине. — М.: Физкультура и спорт // https://books.google.ru/books?id=W8aptgEACAAJ
698. Ботвинник М. М. (1961). Люди и машины за шахматной доской / Шахматы в СССР. № 3.

699. Жанна Михайловна Таль, персональные коммуникации.
700. В шахматы «играет» ЭВМ. Телевизионные новости. Эфир 24.11.1968 // https://www.youtube.com/watch?v=LZEd6ZtSxCo
701. Goodman R., Soni J. (2017). The Man Who Built The Chess Machine / Chess.com // https://www.chess.com/article/view/the-man-who-built-the-chess-machine
702. Ботвинник, М. (1979). От шахматиста — к машине. — М.: Физкультура и спорт // https://books.google.ru/books?id=W8aptgEACAAJ
703. Ботвинник М. М. (1966). Математическое отображение шахматной игры (Пособие для шахматного анализа) / Бюллетень центрального шахматного клуба СССР. № 3.
704. Кухарева А. (2003). Михаил Донской: Я Билла Гейтса ни в чем не виню. ИД «Компьютерра», 2003. Сайт «Домашний компьютер» — приложение к интернет-изданию «Компьюлента» / Сайт Александра Тимофеева // http://atimopheyev.narod.ru/AfterPIONEER/info/PIONEER/2.htm
705. Карпов А. (2022). «Мальчик понятия не имеет о шахматах». Гроссмейстер Карпов — о школе, первых деньгах и знакомстве с Ботвинником / Мел, 25.01.2022 // https://mel.fm/zhizn/knigi/4218760-malchik-ponyatiya-ne-imeyet-o-shakhmatakh-grossmeyster-karpov — o-shkole-pervykh-dengakh-i-znakomstve
706. Botvinnik M., Brown A. (1970). Computers, chess and long-range planning. Springer-Verlag // https://books.google.ru/books?id=ZYx-RAAAAMAAJ
707. Ботвинник М. М. (1968). Алгоритм игры в шахматы. — М. // http://whychess.ru/776algoritm-igru-v-shahmatu.html
708. Книжник С. (2009). Наставник для компьютера / Наука в Сибири. № 17 (2702), 30 апреля // http://www.nsc.ru/HBC/hbc.phtml?5+500+1
709. Ботвинник М. М. (1987). Аналитические и критические работы. Статьи и воспоминания // http://whychess.ru/botvinnik-stati-vospominaniua.html
710. Ботвинник, М. (1979). От шахматиста — к машине. — М.: Физкультура и спорт // https://books.google.ru/books?id=W8aptgEACAAJ
711. Lopez R., Sentef J. (2017). Comments / Marginal Revolution // https://marginalrevolution.com/marginalrevolution/2017/03/new-george-steiner-book.html
712. Lieserson C., Newborn M. (2013). Deep Blue: An Artificial Intelligence Milestone. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=rWPgBwAAQBAJ
713. Berliner H. J. (1977). Experiences in Evaluation with BKG, a Program That Plays Backgammon / Proceedings of IJCAI, 1977 (1979), pp. 428–433 // http://www.bkgm.com/articles/Berliner/ExperiencesInEvaluationWithBKG/index.html
714. Berliner H. J. (1980). Backgammon Computer Program Beats World Champion / Artificial Intelligence, vol. 14 (1980), pp. 205–220 // http://www.bkgm.com/articles/Berliner/BackgammonProgramBeatsWorldChamp/
715. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
716. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
717. Theo van der Storm (2002). North American Computer-Chess Championships: Complete History of Tournament Results and Games // https://old.csvn.nl/ncc_hist.html#17th
718. Atkinson G. (1998). Chess and Machine Intuition. Intellect Books // https://books.google.ru/books?id=ZuTvVo4z060C
719. 6th World Computer Chess Championship / ICGA Tournaments: Tournaments between computer programs: chess, draughts, checkers, Go, backgammon, and more // https://www.game-ai-forum.org/icga-tournaments/tournament.php?id=14
720. All Time Rankings / Edinburgh University Chess Club Home Page // https://web.archive.org/web/20100724043700/http://chess.eusa.ed.ac.uk/Chess/Trivia/AlltimeList.html
721. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
722. Volker Jeschonnek (2000). A Visit to My Opponent's Camp: Introducing Man vs. Machine (CC) Challenges and Wchess / Ralph Marconi Chess Page // https://web.archive.org/web/20001218000600/http://correspondencechess.com/marconi/volker-art.htm
723. Kasparov versus Deep Thought documentary / PBS Nova // https://www.youtube.com/watch?v=mhnDzk9IVAA

724. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
725. Laswon D. (1989). The Pentagon plays chess / The Spectator, 28 Janyary 1989, p. 9 // http://archive.spectator.co.uk/article/28th-january-1989/9/the-pentagon-plays-chess
726. Krauthammer C. (1989). Checkmated by a monster of calculation / The Washington Post, 24 February 1989 // https://www.washingtonpost.com/archive/opinions/1989/02/24/checkmated-by-a-monster-of-calculation/9afad6af-939b-4c6a-8641–7cf5016f2cd5/
727. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
728. Lieserson C., Newborn M. (2013). Deep Blue: An Artificial Intelligence Milestone. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=rWPgBwAAQBAJ
729. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
730. Lieserson C., Newborn M. (2013). Deep Blue: An Artificial Intelligence Milestone. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=rWPgBwAAQBAJ
731. Theo van der Storm (2002). North American Computer-Chess Championships: Complete History of Tournament Results and Games // https://old.csvn.nl/ncc_hist.html#22th
732. Jiu H. (1993). P. C. CORNER // https://www.thecrimson.com/article/1993/11/9/p-c-corner-pwhen-current-us
733. Lieserson C., Newborn M. (2013). Deep Blue: An Artificial Intelligence Milestone. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=rWPgBwAAQBAJ
734. Theo van der Storm. Harvard Cup Human vs. Computer Chess Challenge // https://old.csvn.nl/harvhist.html#4th
735. 8th World Computer Chess Championship / ICGA Tournaments: Tournaments between computer programs: chess, draughts, checkers, Go, backgammon, and more // https://www.game-ai-forum.org/icga-tournaments/tournament.php?id=29
736. Lieserson C., Newborn M. (2013). Deep Blue: An Artificial Intelligence Milestone. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=rWPgBwAAQBAJ
737. Newborn M. (2012). Kasparov versus Deep Blue: Computer Chess Comes of Age. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=IiXjBwAAQBAJ
738. All Time Rankings / Edinburgh University Chess Club Home Page // https://web.archive.org/web/20100724043700/http://chess.eusa.ed.ac.uk/Chess/Trivia/AlltimeList.html
739. Lieserson C., Newborn M. (2013). Deep Blue: An Artificial Intelligence Milestone. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=rWPgBwAAQBAJ
740. Müller K., Schaeffer J. (2018). Man Vs. Machine: Challenging Human Supremacy at Chess. New York, NY, USA: Russell Enterprises, Incorporated // https://books.google.ru/books?id=0GV2DwAAQBAJ
741. Antonoff M. (1996). Curtains for Kasparov? / Popular Science, No. 3, 1996 // https://books.google.ru/books?id= –TKv7UHgoTQC&pg=PA43
742. Lieserson C., Newborn M. (2013). Deep Blue: An Artificial Intelligence Milestone. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=rWPgBwAAQBAJ
743. Isenberg G. (2018). Frans Morsch / Chess Programming Wiki // https://www.chessprogramming.org/Frans_Morsch
744. Гниренко В. (2012). Рекорды двух символических клубов / Шахматное обозрение. № 1.
745. Jones B. (2007). Grandmaster Maurice Ashley comes to Baltimore, playing chess — and teacher / The Baltimore Sun, October 3 // https://www.baltimoresun.com/news/bs-xpm-2007–10–03–0710030152-story.html
746. Lieserson C., Newborn M. (2013). Deep Blue: An Artificial Intelligence Milestone. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=rWPgBwAAQBAJ
747. Gaulin E. (1996). Computer 1, chess champion 0 / Atlanta Journal and Constitution, February 11.
748. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
749. Lieserson C., Newborn M. (2013). Deep Blue: An Artificial Intelligence Milestone. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=rWPgBwAAQBAJ
750. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion.

Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
751. Lieserson C., Newborn M. (2013). Deep Blue: An Artificial Intelligence Milestone. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=rWPgBwAAQBAJ
752. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
753. Lieserson C., Newborn M. (2013). Deep Blue: An Artificial Intelligence Milestone. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=rWPgBwAAQBAJ
754. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
755. Lieserson C., Newborn M. (2013). Deep Blue: An Artificial Intelligence Milestone. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=rWPgBwAAQBAJ
756. Waga P. (1996). Kasparov, IBM plan man vs. machine rematch / The Reporter Dispatch, Gannett Suburban Newspapers, August 21,1996.
757. Saylor M. (1997). Computers cast a long shadow on chessboard / Los Angeles Times, May 1 // https://www.latimes.com/archives/la-xpm-1997–05–01-mn-54193-story.html
758. Antonoff M. (1997). Game, net & match / Yahoo Internet Life, May.
759. Kasparov challenger receives an upgrade / The New York Times, May 1, 1997.
760. Kim J. (1997). More than just chess. But not as simple as man vs.computer / USA Today, May 2.
761. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
762. Lieserson C., Newborn M. (2013). Deep Blue: An Artificial Intelligence Milestone. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=rWPgBwAAQBAJ
763. Lieserson C., Newborn M. (2013). Deep Blue: An Artificial Intelligence Milestone. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=rWPgBwAAQBAJ
764. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
765. Chess Opening Explorer / 365Chess.com: Biggest Chess Games Database Online // https://www.365chess.com/opening.php
766. Müller K., Schaeffer J. (2018). Man Vs. Machine: Challenging Human Supremacy at Chess. New York, NY, USA: Russell Enterprises, Incorporated // https://books.google.ru/books?id=0GV2DwAAQBAJ
767. Ingo Althoefer vs Deep Thought (Computer), Hanover (1991). Mieses Opening: Reversed Rat (A00), 0–1 / chessgames.com: online chess database and community // http://www.chessgames.com/perl/chessgame?gid=1472153
768. Althöfer I. (2013). Random Structures from Lego Bricks and Analog Monte Carlo Procedures // https://www.althofer.de/random-lego-structures.pdf
769. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
770. Bonesteel, Mark (2017). Diego Maradona admits video replay would have erased his ‘Hand of God’ goal / The Washington Post, 26 July // https://www.washingtonpost.com/news/early-lead/wp/2017/07/26/diego-maradona-admits-video-replay-would-have-erased-his-hand-of-god-goal/
771. Weber B. (1996). Chess Computer Seeking Revenge Against Kasparov / New York Times, August 20 // https://www.nytimes.com/1996/08/20/nyregion/chess-computer-seeking-revenge-against-kasparov.html
772. Kasparov G., Greengard M. (2017). Deep Thinking: Where Machine Intelligence Ends and Human Creativity Begins. John Murray Press // https://books.google.ru/books?id=ffYZDQAAQBAJ
773. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
774. Kasparov G., Greengard M. (2017). Deep Thinking: Where Machine Intelligence Ends and Human Creativity Begins. John Murray Press // https://books.google.ru/books?id=ffYZDQAAQBAJ
775. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
776. Kasparov G., Greengard M. (2017). Deep Thinking: Where Machine Intelligence Ends and Human Creativity Begins. John Murray Press // https://books.google.ru/books?id=ffYZDQAAQBAJ

777. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
778. Kasparov G., Greengard M. (2017). Deep Thinking: Where Machine Intelligence Ends and Human Creativity Begins. John Murray Press // https://books.google.ru/books?id=ffYZDQAAQBAJ
779. Deep Blue (Computer) vs Garry Kasparov, New York (1997). Caro-Kann Defense: Karpov. Modern Variation (B17), 1–0 / chessgames.com: online chess database and community // http://www.chessgames.com/perl/chessgame?gid=1070917
780. Kasparov G., Greengard M. (2017). Deep Thinking: Where Machine Intelligence Ends and Human Creativity Begins. John Murray Press // https://books.google.ru/books?id=ffYZDQAAQBAJ
781. Dirk Jan ten Geuzendam (2009). Interview: Miguel Illescas / New In Chess magazine. No. 5.
782. Kasparov G., Greengard M. (2017). Deep Thinking: Where Machine Intelligence Ends and Human Creativity Begins. John Murray Press // https://books.google.ru/books?id=ffYZDQAAQBAJ
783. Hoffman P. (2003). Retooling Machine and Man For Next Big Chess Faceoff / The New York Times, Jan. 21 // https://www.nytimes.com/2003/01/21/science/retooling-machine-and-man-for-next-big-chess-faceoff.html
784. Rebel vs Yusupov // http://www.rebel.nl/italy.htm
785. Rebel vs Anand // http://www.rebel.nl/anand.htm
786. Kramnik-Deep Fritz match ends in 4–4 draw! / The Chess Drum // https://www.thechessdrum.net/newsbriefs/2002/NB_BrainGames2.html
787. An interview with world chess champion Vladimir Kramnik on Man vs Machine and Classical World Championships // https://en.chessbase.com/post/vladimir-kramnik-on-man-vs-machine-and-world-championships
788. Shabazz D. (2003). Kasparov & Deep Junior fight 3–3 to draw! / The Chess Drum // https://www.thechessdrum.net/tournaments/Kasparov-DeepJr/
789. Biever C. (2003). Kasparov 'forced' to draw with X3D Fritz / New Scientist, 12 November // https://www.newscientist.com/article/dn4376-kasparov-forced-to-draw-with-x3d-fritz/
790. Bilbao Man vs Machine — a resume // https://en.chessbase.com/post/bilbao-man-vs-machine-a-resume
791. 8:4 final score for the machines — what next? // https://en.chessbase.com/post/8–4-final-score-for-the-machines-what-next-
792. Adams vs Hydra: Man 0.5 — Machine 5.5 // https://en.chessbase.com/post/adams-vs-hydra-man-0–5-machine-5–5
793. Schulz A. (2006). Kramnik gegen Deep Fritz: Das letzte Match Mensch gegen Maschine? / Spiegel Online // https://www.spiegel.de/netzwelt/tech/kramnik-gegen-deep-fritz-das-letzte-match-mensch-gegen-maschine-a-450147.html
794. Crowther M. (2009). The week in chess, 771, 17th August 2009 // https://web.archive.org/web/20110930232108/http://www.chess.co.uk/twic/twic771.html#13
795. Ertel W., Black N. (2018). Introduction to Artificial Intelligence. Springer International Publishing // https://books.google.ru/books?id=geFHDwAAQBAJ
796. Kaufman L. (2008). The Dzindzi — Rybka 3 Handicap Match // https://en.chessbase.com/post/the-dzindzi-rybka-3-handicap-match
797. Kaufman L. (2008). The Milov vs. Rybka Handicap Match // https://en.chessbase.com/post/the-milov-vs-rybka-handicap-match
798. Komodo handicap matches / Komodo chess engine // http://komodochess.com/store/pages.php?cmsid=17
799. Осень шахматиста. Михаил Ботвинник (1990) // https://www.youtube.com/watch?v=IQZqNob6Opo
800. Tahan M. (1993). The Man Who Counted: A Collection of Mathematical Adventures. New York: W. W. Norton & Co., pp. 113–115 // https://books.google.ru/books?id=WMv_2aSlXOoC&pg=PA113
801. Crops (2017) / FAOSTAT. Retrieved 2019–08–18. Countries — Select All; Regions — World + (Total); Elements — Production Quantity; Items — Wheat; Years — 2017 // http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/
802. Shannon C. E. (1950). Programming a Computer for Playing Chess / Philosophical Magazine, Ser. 7, Vol. 41, No. 314 // https://vision.unipv.it/IA1/aa2009–2010/ProgrammingaComputerforPlayingChess.pdf
803. Allis V. (1994). Searching for Solutions in Games and Artificial Intelligence (PDF). Ph. D. Thesis, University of Limburg, Maastricht, The Netherlands // http://fragrieu.free.fr/SearchingForSolutions.pdf
804. Saul E. (2013). The Coded Universe: The Path to Eternity. Red Lead Press // https://books.google.ru/books?id=E22mj8ImiKwC
805. Tromp J. (2010). John's Chess Playground // https://tromp.github.io/chess/chess.html
806. Bob23 (2018). GUIDE: Setting up Leela on a Chess GUI / Lco blog // http://blog.lczero.org/2018/09/guide-setting-up-leela-on-chess-gui.html

807. Левенчук А. (2015). Интеллект-стек // https://youtu.be/1mL2DL6ZBSw?t=965
808. Hsu F. (2004). Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press // https://books.google.ru/books?id=WOk9DwAAQBAJ
809. CCRL 40/40 Downloads and Statistics: Complete rating list, retrieved 2022–01–27 // https://ccrl.chessdom.com/ccrl/4040/rating_list_all.html
810. Azevedo F. A., Carvalho L. R., Grinberg L. T., Farfel J. M., Ferretti R. E., Leite R. E. P., Filho W. J., Lent R., Herculano-Houzel S. (2009). Equal numbers of neuronal and nonneuronal cells make the human brain an isometrically scaled-up primate brain / Journal of Comparative Neurology, Vol. 513 (5), pp. 532–541 // https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19226510/
811. Dresbach T., Qualmann B., Kessels M. M., Garner C. C., Gundelfinger E. D. (2001). The presynaptic cytomatrix of brain synapses / Cellular and Molecular Life Sciences, Vol. 58, pp. 94–116 // https://doi.org/10.1007/PL00000781
812. Donald C. Cooper (2014). Introduction to Neuroscience. CU Neuroscience Series // https://books.google.ru/books?id=jXnkai44PxYC
813. Goldman B. (2010). New imaging method developed at Stanford reveals stunning details of brain connections // https://med.stanford.edu/news/all-news/2010/11/new-imaging-method-developed-at-stanford-reveals-stunning-details-of-brain-connections.html
814. Hu E. Y., Yu G., Song D., Bouteiller C. J., Berger W. T. (2018). Modeling Nonlinear Synaptic Dynamics: A Laguerre-Volterra Network Framework for Improved Computational Efficiency in Large Scale Simulations. Conference proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference, 64 (2), pp. 6129–6132 // http://europepmc.org/articles/PMC6462142
815. Beniaguev D., Segev I., London M. (2021). Single cortical neurons as deep artificial neural networks / Neuron, Vol. 109, Iss. 17, pp. 2727–2739.e3 // https://doi.org/10.1016/j.neuron.2021.07.002
816. Whitten A. (2021). How Computationally Complex Is a Single Neuron? / Quanta Magazine, September 2, 2021 // https://www.quantamagazine.org/how-computationally-complex-is-a-single-neuron-20210902
817. Уиттен Э. (2021). Насколько сложной должна быть компьютерная модель одного нейрона? / Пер. с англ. Горлова А // https://22century.ru/popular-science-publications/a-single-neuron-is-very-complex
818. NVIDIA H100 SXM5 80 GB (2023) / TechPowerUp // https://www.techpowerup.com/gpu-specs/h100-sxm5–80-gb.c3900
819. Creating Tomorrow's Next-Generation Technologies Today // https://forums.xilinx.com/t5/Xilinx-Xclusive-Blog/Creating-Tomorrow-s-Next-Generation-Technologies-Today/ba-p/1156382
820. Gerstner W., Kistler W. (2002). Spiking Neuron Models: Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge University Press // https://books.google.ru/books?id=Rs40c7HfxIUC
821. Virtex UltraScale+ FPGA Data Sheet: DC and AC Switching Characteristics // https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds923-virtex-ultrascale-plus.pdf
822. John Tromp (2016). Number of legal Go positions // https://tromp.github.io/go/legal.html
823. Allis V. (1994). Searching for Solutions in Games and Artificial Intelligence (Ph. D. thesis). University of Limburg, Maastricht, The Netherlands // https://project.dke.maastrichtuniversity.nl/games/files/phd/SearchingForSolutions.pdf
824. Good I. J. (1965). The Mystery of Go / New Scientist, 21 January // http://www.chilton-computing.org.uk/acl/literature/reports/p019.htm
825. Wedd N. (2016). Human-Computer Go Challenges / computer-go.info // http://www.computer-go.info/h-c/index.html
826. Cho A. (2016). 'Huge leap forward': Computer that mimics human brain beats professional at game of Go / Science // https://www.sciencemag.org/news/2016/01/huge-leap-forward-computer-mimics-human-brain-beats-professional-game-go
827. Millen J. K. (1981). Programming the Game of Go / Byte, April 1981 // https://archive.org/stream/byte-magazine-1981–04/1981_04_BYTE_06–04_Future_Computers#page/n101/mode/2up
828. Webster B. (1984). A Go Board for the Macintosh / Byte, November 1981 // https://archive.org/stream/byte-magazine-1984–11/1984_11_BYTE_09–12_New_Chips#page/n125/mode/2up
829. Macfadyen M. (1984). Computer Go / British Go Journal, No. 61. March 1984 // https://www.britgo.org/bgj/06123.html
830. History of Go-playing Programs / Go British Association // https://www.britgo.org/computergo/history
831. Bronislaw Przybyla (1984). Acornsoft Go / Sensei's Library // https://senseis.xmp.net/? AcornsoftGo

832. History of Go-playing Programs / Go British Association // https://www.britgo.org/computergo/history
833. Burmeister J., Wiles J. CS-TR-339 Computer Go Tech Report // https://staff.itee.uq.edu.au/janetw/Computer%20Go/CS-TR-339.html#6.2
834. History of Go-playing Programs / Go British Association // https://www.britgo.org/computergo/history
835. Strickland J. (2010). Top 5 Computer vs. Human Game Matchups / howstuffworks // https://electronics.howstuffworks.com/5-computer-vs-human-game-matchups5.htm
836. Aydinian H., Cicalese F., Deppe C. (2013). Information Theory, Combinatorics, and Search Theory: In Memory of Rudolf Ahlswede. Springer Berlin Heidelberg // https://books.google.ru/books?id=qVW-5BQAAQBAJ
837. Cosmic Style V. S. Zen (Computer Go) / The Nihon Ki-in [Японская ассоциация го] // https://www.nihonkiin.or.jp/english/topics/12/topics2012_03.htm#120326f
838. Shotwell P. (2011). Go! More Than a Game. Tuttle Publishing // https://books.google.ru/books?id=qf_QAgAAQBAJ
839. House P. (2014). The Electronic Holy War / The Ney Yorker, March 25, 2014 // https://www.newyorker.com/tech/annals-of-technology/the-electronic-holy-war
840. Althöfer I., Snatzke R. G. (2016). The codecentric Go Challenge 2014: Franz-Josef Dickhut vs. CRAZY STONE / ICGA Journal, Vol. 37, Iss. 4, pp. 232–236 // https://www.researchgate.net/publication/293799776_The_codecentric_Go_Challenge_2014_Franz-Josef_Dickhut_vs_CRAZY_STONE
841. Syed O. The Creation of Arimaa // http://arimaa.com/arimaa/
842. Натансон Л., Серов А., Лесной Д. МАРЬЯЖ для Windows: академическое издание // https://dr-vamp-r.ucoz.ru/load/1–1–0–5
843. The Computer Is A Cheating Bastard: Civilization / TV Tropes // https://tvtropes.org/pmwiki/pmwiki.php/TheComputerIsACheatingBastard/Civilization
844. Müller K., Schaeffer J. (2018). Man Vs. Machine: Challenging Human Supremacy at Chess. New York, NY, USA: Russell Enterprises, Incorporated // https://books.google.ru/books?id=0G-V2DwAAQBAJ
845. Victor Allis (1994). Searching for Solutions in Games and Artificial Intelligence (PDF). Ph. D. Thesis, University of Limburg, Maastricht, The Netherlands // http://fragrieu.free.fr/SearchingForSolutions.pdf
846. Tesauro G. (1992). Practical issues in temporal difference learning / Machine Learning, Vol. 8, Iss. 3–4, pp. 257–277 // https:// doi.org/10.1007/BF00992697
847. Coulom R. (2011). CLOP: Confident Local Optimization for Noisy Black-Box Parameter Tuning // https://www.remi-coulom.fr/CLOP/
848. Stockfish Testing Queue, retrieved 2020–04–25 // http://tests.stockfishchess.org
849. Stockfish Testing Queue, retrieved 2022–01–28 // http://tests.stockfishchess.org
850. Goujon P. (2001). From Biotechnology to Genomes: The Meaning of the Double Helix. World Scientific Publishing Company // https://books.google.ru/books?id=qRJsTiUAO_AC
851. Kline R. (2015). The Cybernetics Moment: Or Why We Call Our Age the Information Age. Johns Hopkins University Press // https://books.google.ru/books?id=WgPHCQAAQBAJ
852. Mayer J. (2009). Jack Ellwood Steele // http://www.ilasting.com/jacksteele.php
853. Bionics / Online Ethymology Dictionary // https://www.etymonline.com/word/bionics
854. Goujon P. (2001). From Biotechnology to Genomes: The Meaning of the Double Helix. World Scientific Publishing Company // https://books.google.ru/books?id=qRJsTiUAO_AC
855. Meet the Board of Directors: Janine Benyus / Biomimicry Institute // https://biomimicry.org/board/
856. Jacobs S. (2014). Biomimetics: A simple foundation will lead to new insight about process. International Journal of Design & Nature and Ecodynamics, Vol. 9, pp. 83–94 // https://doi.org/10.2495/DNE-V9-N2–83–94.
857. Hallion R. (2003). Taking Flight: Inventing the Aerial Age, from Antiquity Through the First World War. Oxford University Press, USA // https://books.google.ru/books?id=YRqV_PayIKIC
858. Opdycke L. (1999). French Aeroplanes Before the Great War. Schiffer Pub // https://books.google.ru/books?id=qAAKAQAAMAAJ
859. Crouch T. D. (2019). Ader Éole / Encyclopædia Britannica // https://www.britannica.com/topic/Ader-Eole
860. Suddath C. (2010). A Brief History of: Velcro / Time, Tuesday, June 15, 2010 // http://content.time.com/time/nation/article/0,8599,1996883,00.html
861. Brian D., Bharat B. (2010). Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review / Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering

Sciences, 28 October 2010 // http://doi.org/10.1098/rsta.2010.0201

862. Mann E. E., Mettetal M. R., May R. M., Drinker M. C., Stevenson B. C., Baiamonte V. L., Marso J. M., Dannemiller E. A., Parker A. E., Reddy S. T., Sande M. K. (2014). Surface Micropattern Resists Bacterial Contamination Transferred by Healthcare Practitioners / Journal of Microbiology & Experimentation, Vol. 1, Iss. 5 // https://www.sharklet.com/2015/01/19/surface-micropattern-resists-bacterial-contamination-transferred-by-healthcare-practitioners-2014/
863. Elliott D. (2009). Designing packs as nature intended / PackagingNews, 30 September 2009 // https://www.packagingnews.co.uk/news/designing-packs-as-nature-intended-30–09–2009
864. Mahdavi A., Ferreira L., Sundback C., Nichol J. W., Chan E. P., Carter D. J. D., Bettinger C. J., Patanavanich S., Chignozha L., Ben-Joseph E., Galakatos A., Pryor H., Pomerantseva I., Masiakos P. T., Faquin W., Zumbuehl A., Hong S., Borenstein J., Vacanti J., Langer R., Karp J. M. (2008). A biodegradable and biocompatible gecko-inspired tissue adhesive / Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 105, Iss. 7, pp. 2307–2312 // https://doi.org/10.1073/pnas.0712117105
865. Kastrup C. J., Nahrendorf M., Figueiredo J. L., Lee H., Kambhampati S., Lee T., Cho S.-W., Gorbatov R., Iwamoto Y., Dang T. T., Dutta P., Yeon J. H., Cheng H., Pritchard C. D., Vegas A. J., Siegel C. D., MacDougall S., Okonkwo M., Thai A., Stone J. R., Coury A. J., Weissleder R., Langer R., Anderson D. G. (2012). Painting blood vessels and atherosclerotic plaques with an adhesive drug depot / Proceedings of the National Academy of Sciences, Dec 26, 2012 // https://www.pnas.org/content/early/2012/12/10/1217972110
866. Li Y., Huang X. J., Heo S. H., Li C. C., Choi Y. K., Cai W. P., Cho S. O. (2007). Superhydrophobic Bionic Surfaces with Hierarchical Microsphere/SWCNT Composite Arrays / Langmuir 2007, Vol. 23, Iss. 4, pp. 2169–2174, November 16, 2006 // https://doi.org/10.1021/la0620758
867. Potyrailo R. A., Bonam R. K., Hartley J. G., Starkey T. A., Vukusic P., Vasudev M., Bunning T., Naik R. R., Tang Z., Palacios M. A., Larsen M., Le Tarte L. A., Grande J. C., Zhong S., Deng T. (2015). Towards outperforming conventional sensor arrays with fabricated individual photonic vapour sensors inspired by Morpho butterflies / Nature Communications, Vol. 6, Article number: 7959 // https://www.nature.com/articles/ncomms8959
868. Platé N. (1993). Liquid-Crystal Polymers. Springer US // https://books.google.ru/books?id=a3wjjzrmwfoC
869. Spencer N. J., Hu H. (2020). Enteric nervous system: sensory transduction, neural circuits and gastrointestinal motility / Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, Vol. 17, pp. 338–351 // https://doi.org/10.1038/s41575–020–0271–2
870. Banhey J., von Bartheld C. S. (2017). The Cellular Composition and Glia-Neuron Ratio in the Spinal Cord of a Human and a Non-Human Primate: Comparison with other Species and Brain Regions / Anatomical record (Hoboken, N. J.), Vol. 301, Iss. 4, pp. 697–710 // https://doi.org/10.1002/ar.23728
871. Huffman C. (2017). Alcmaeon / Stanford Encyclopedia of Philosophy // https://plato.stanford.edu/entries/alcmaeon/
872. Elhadi A. M., Kalb S., Perez-Orribo L., Little A. S., Spetzler R. F., Preul M. C. (2012). The Journey of Discovering Skull Base Anatomy in Ancient Egypt and the Special Influence of Alexandria / Neurosurgical Focus, Vol. 33, Iss. 2: e2 // https://www.medscape.com/viewarticle/769263_6
873. Hobbes T. (1969). Leviathan, 1651. Scolar P // https://books.google.ru/books?id=8xyDAAAAMAAJ
874. Kulstad M., Carlin L. (2013). Leibniz's Philosophy of Mind / Stanford Encyclopedia of Philosophy // https://plato.stanford.edu/entries/leibniz-mind/
875. Robbins J. (2008). A Symphony in the Brain: The Evolution of the New Brain Wave Biofeedback. Grove Press // https://books.google.ru/books?id=u-cRimHppmvoC
876. Niedermeyer E., Silva F. d. (2005). Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields. Lippincott Williams & Wilkins // https://books.google.ru/books?id=tndqYGPHQdEC
877. Robbins J. (2008). A Symphony in the Brain: The Evolution of the New Brain Wave Biofeedback. Grove Press // https://books.google.ru/books?id=u-cRimHppmvoC
878. Niedermeyer E., Silva F. d. (2005). Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields. Lippincott Williams & Wilkins // https://books.google.ru/books?id=tndqYGPHQdEC
879. Robbins J. (2008). A Symphony in the Brain: The Evolution of the New Brain Wave Biofeedback. Grove Press // https://books.google.ru/books?id=u-cRimHppmvoC
880. Niedermeyer E., Silva F. d. (2005). Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields. Lippincott Williams & Wilkins // https://books.google.ru/books?id=tndqYGPHQdEC

881. Yamada T., Meng E. (2009). Practical Guide for Clinical Neurophysiologic Testing: EEG. Lippincott Williams & Wilkins // https://books.google.ru/books?id=VdsUrV8jeZ4C
882. Beck A. (1890). Die Bestimmung der Localisation des Gehirn — und Rückenmarksfunctionen vermittelst der electrischen Erscheinungen / Zentralblatt für Physiologie, Bd. 4, S. 473–476 // https://www.biodiversitylibrary.org/item/49793#page/481/mode/1up
883. Yamada T., Meng E. (2009). Practical Guide for Clinical Neurophysiologic Testing: EEG. Lippincott Williams & Wilkins // https://books.google.ru/books?id=VdsUrV8jeZ4C
884. Jabr F. (2012). Know Your Neurons: The Discovery and Naming of the Neuron / Scientific American, May 14, 2012 // https://blogs.scientificamerican.com/brainwaves/know-your-neurons-the-discovery-and-naming-of-the-neuron/
885. The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1906 / NobelPrize.org, Nobel Media AB 2020, 6 May 2020 // https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1906/summary/
886. Douglas Fields R. (2017). Why the First Drawings of Neurons Were Defaced / Quantamagazine, September 28, 2017 // https://www.quantamagazine.org/why-the-first-drawings-of-neurons-were-defaced-20170928/
887. Borch-Jacobsen M. (2012). Ernst Fleischl von Marxow (1846–1891): Freud's first therapeutic blunder and how he lied about it / Psychology Today, Feb 07, 2012 // https://www.psychologytoday.com/intl/blog/freuds-patients-serial/201202/ernst-fleischl-von-marxow-1846–1891
888. Medwed H. (1997). Ernst Fleischl von Marxow (1846–1891): Leben und Werk. Medienverl. Köhler // https://books.google.ru/books?id=lGB4AAAACAAJ
889. Wickens A. (2009). Introduction to Biopsychology. Pearson Education // https://books.google.ru/books?id=DlBHRK6NGs0C
890. Niedermeyer E., Silva F. d. (2005). Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields. Lippincott Williams & Wilkins // https://books.google.ru/books?id=tndqYGPHQdEC
891. Данилевский В. Я. (1949). Электрические явления в головном мозге / Первые отечественные исследования по электроэнцефалографии. — М. С. 87–88.
892. История изучения биоэлектрической активности головного мозга (2020) / Центр Медицинской Информации. Научная библиотека лаборатории электрофизиологии НЦИЛС // https://cmi.to/электрофизиология-2/электрофизиология-головного-мозга/история-изучения-биоэлектрической-а/
893. Шойфет М. С. (2011). Сто великих врачей. Вече // https://books.google.ru/books?id= –f2xkgEACAAJ
894. Караченцев Ю. И. (2009). К 90-летию со дня основания Института проблем эндокринной патологии им. В. Я. Данилевского: страницы истории, достижения и перспективы / Новости медицины и фармации. № 10 (284) // http://www.mif-ua.com/archive/issue-9091/article-9106/
895. Введенский Н. Е. (1884). Телефонические исследования над электрическими явлениями в мышечных и нервных аппаратах. — СПб. // http://books.e-heritage.ru/book/10070047
896. Niedermeyer E., Silva F. d. (2005). Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields. Lippincott Williams & Wilkins // https://books.google.ru/books?id=tndqYGPHQdEC
897. Pravdich-Neminsky, VV. (1913). Ein Versuch der Registrierung der elektrischen Gehirnerscheinungen / Zentralblatt für Physiologie, Bd. 27, S. 951–60 // https://www.biodiversitylibrary.org/item/50775#page/967/mode/1up
898. Niedermeyer E., Silva F. d. (2005). Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields. Lippincott Williams & Wilkins // https://books.google.ru/books?id=tndqYGPHQdEC
899. Ibañez D. (2014). Hans Berger: Lights and Shadows of the Inventor of Electroencephalography / NE neuroelectrics // https://www.neuroelectrics.com/blog/2014/12/18/hans-berger-lights-and-shadows-of-the-inventor-of-electroencephalography/
900. Rooney A. (2017). The History of Neuroscience. The Rosen Publishing Group, Inc // https://books.google.ru/books?id=Hd1hDwAAQBAJ
901. Radin D. (2009). Entangled Minds: Extrasensory Experiences in a Quantum Reality. New York: Paraview Pocket Books // https://books.google.ru/books?id=sUM1Hc-KwJQC
902. Wiedemann H. R. (1994). Hans Berger / European Journal of Pediatrics, Vol. 153, Iss. 10, p. 705 // https://doi.org/10.1007/BF01954482
903. Finger S. (2004). Minds behind the Brain: A History of the Pioneers and Their Discoveries. Oxford University Press // https://books.google.ru/books?id=3OWU1wnOy84C
904. Finger S. (2004). Minds behind the Brain: A History of the Pioneers and Their Discoveries. Oxford University Press // https://books.google.ru/books?id=3OWU1wnOy84C

905. Berger H. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen / Archiv Für Psychiatrie Und Nervenkrankheiten, Bd. 87, Ausg. 1, S. 527–570 // https://doi.org/10.1007/bf01797193 // http://www.audiomentaltraining.com/app/wp-content/uploads/Berger-1929-FirstEEG.pdf
906. Niedermeyer E., Silva F. d. (2005). Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields. Lippincott Williams & Wilkins // https://books.google.ru/books?id=tndqYGPHQdEC
907. Grass A. M. (1984). The Electroencephalographic Heritage Until 1960 / American Journal of EEG Technology, Vol. 24, pp. 133–173 // https://doi.org/10.1080/00029238.1984.11080140
908. Niedermeyer E., Silva F. d. (2005). Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields. Lippincott Williams & Wilkins // https://books.google.ru/books?id=tndqYGPHQdEC
909. Berger H. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. Archiv Für Psychiatrie Und Nervenkrankheiten, Bd. 87, Ausg. 1, S. 1, pp. 527–570 // https://doi.org/10.1007/bf01797193
910. Niedermeyer E., Silva F. d. (2005). Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields. Lippincott Williams & Wilkins // https://books.google.ru/books?id=tndqYGPHQdEC
911. Zeidman L. A., Stone J., Kondziella D. (2013). New revelations about Hans Berger, father of the EEG, and his ties to the Third Reich // https://doi.org/10.1177/0883073813486558
912. Zeidman L. A., Kondziella D., Stone J. L. (2016). Authors' Response to Letter to the Editor / Journal of Child Neurology, Vol. 31, Iss. 14 // https://doi.org/10.1177/0883073816662419
913. Berger H. (1940). Psyche. Jena: Gustav Fischer // https://books.google.ru/books?id=mbOgvQEACAAJ
914. du Bois-Reymond E. (1848). Untersuchungen über tierische Elektrizität / Von den allgemeinen Gesetzen der Nervenerregung durch den elektrischen Strom (Band 1, Kapitel 2.2). G. Reimer, Berlin // https://archive.org/details/bub_gb_AtkPAAAAQAAJ/page/n6
915. Tasaki I. (2012). Physiology and Electrochemistry of Nerve Fibers. Elsevier // https://books.google.ru/books?id=3ttzcDBIwRIC
916. Fick A. (1863). Beiträge zur vergleichenden Physiologie der irritabelen Substanzen: Mit in den Text eingedruckten Holzstichen. Vieweg // https://books.google.ru/books?id=zCFCAAAAcAAJ
917. von Kries J. (1882). Ueber die Erregung des motorischen Nerven durch Wechselströme / Berichte über die Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau, Bd. 8, Ausg. 2, S. 170–204 // https://www.biodiversitylibrary.org/item/42625#page/198/mode/1up
918. Pflüger E. (1859). Untersuchungen über die Physiologie des Electrotonus. August Hirschwald.
919. Tasaki I. (2012). Physiology and Electrochemistry of Nerve Fibers. Elsevier // https://books.google.ru/books?id=3ttzcDBIwRIC
920. Горбунов Б. Б., Востриков В. А., Нестеренко И. В., Телышев Д. В. (2018). История открытия закона Гоорвега — Вейса — Лапика / Медицинская техника. № 5 (311) // http://www.defibrillation.ru/download/Medicinskaya_texnika,2018,5,48–50.pdf
921. Hoorweg J. L. (1892). Ueber die elektrische Nervenerregung / Archiv für die gesame Physiologie des Menschen und der Tiere, Bd. 52, Ausg. 3–4, S. 87–108 // https://doi.org/10.1007/BF01661875
922. Tasaki I. (2012). Physiology and Electrochemistry of Nerve Fibers. Elsevier // https://books.google.ru/books?id=3ttzcDBIwRIC
923. Pflüger E. (1893). J. L. Hoorweg und die electrische Nervenerregung / Archiv für die gesame Physiologie des Menschen und der Tiere, Bd. 53, Ausg. 11–12, S. 616.
924. Weiss G. (1901). Sur la possibilité de rendre comparables entre eux les appareils servant à l'excitation électricque / Archives Italiennes de Biologie, Vol. 35, Iss. 1, pp. 413–446 // http://www.architalbiol.org/aib/article/view/35413
925. van Dongen M., Serdijn W. (2016). Design of Efficient and Safe Neural Stimulators: A Multidisciplinary Approach. Analog Circuits and Signal Processing. Springer International Publishing // https://books.google.ru/books?id=UGahCwAAQBAJ
926. Tasaki I. (2012). Physiology and Electrochemistry of Nerve Fibers. Elsevier // https://books.google.ru/books?id=3ttzcDBIwRIC
927. Lapicque L. (1909). Définition expérimentale de l'excitabilité / Comptes rendus des séances de la Société de biologie, 67, 280–283 // https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6541404v/f288.image
928. Brunel N., van Rossum M. C. W. (2007). Lapicque's 1907 paper: from frogs to integrate-and-fire / Biological Cybernetics, Vol. 97, pp. 337–339 // https://doi.org/10.1007/s00422–007–0190–0
929. Monnier A. M. (2008). Lapicque, Louis / Complete Dictionary of Scientific Biography // https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesaurus-es-pictures-and-press-releases/lapicque-louis
930. M. Max Lebaudy's yacht: A Mother's Neat Little Scheme Fails Of Its Aim, but Benefits Science / Los Angeles Herald, Volume 41, Number 25, 5 November 1893 //

https://cdnc.ucr.edu/?a=d&d=LAH18931105&e=-------en--20--1--txt-txIN-------1

931. Monnier A. M. (2008). Lapicque, Louis / Complete Dictionary of Scientific Biography // https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesaurus-es-pictures-and-press-releases/lapicque-louis
932. Pinault M. (2000). Frédéric Joliot-Curie. O. Jacob // https://books.google.ru/books?id=ZQF1O1DLvHsC
933. Duclert V. (1998). La Ligue de “l’epoque heroique”: la politique des savants / Le Mouvement Social, Vol. 183 (27) // https://doi:10.2307/3779613
934. Monnier A. M. (2008). Lapicque, Louis / Complete Dictionary of Scientific Biography // https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesaurus-es-pictures-and-press-releases/lapicque-louis
935. Lapicque L. (1907). Recherches quantitatives sur l’excitation electrique des nerfs traitee comme une polarization / Journal of Physiol Pathol Générale, 9, 620–635 // https://fr.wikisource.org/wiki/Recherches_quantitatives_sur_l%27excitation_%C3%A9lectrique_des_nerfs_trait%C3%A9e_comme_une_polarisation
936. Lapicque L. (2007). Quantitative investigations of electrical nerve excitation treated as polarization. Translated by: Nicolas Brunel, Mark C. W. van Rossum / Biological Cybernetics, 2007 // https://core.ac.uk/download/pdf/21172797.pdf
937. Горбунов Б. Б., Востриков В. А., Нестеренко И. В., Телышев Д. В. (2018). История открытия закона Гоорвега — Вейса — Лапика / Медицинская техника, октябрь // https://www.researchgate.net/publication/328579029_The_History_of_the_Discovery_of_the_Hoorweg-Weiss-Lapicque_Law
938. Brunel N., van Rossum M. C. W. (2007). Lapicque’s 1907 paper: from frogs to integrate-and-fire / Biological Cybernetics, Vol. 97, pp. 337–339 // https://doi.org/10.1007/s00422–007–0190–0
939. Monnier A. M. (2008). Lapicque, Louis / Complete Dictionary of Scientific Biography // https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesaurus-es-pictures-and-press-releases/lapicque-louis
940. Tasaki I. (2012). Physiology and Electrochemistry of Nerve Fibers. Elsevier // https://books.google.ru/books?id=3ttzcDBIwRIC
941. Monnier A. M. (2008). Lapicque, Louis / Complete Dictionary of Scientific Biography // https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesaurus-es-pictures-and-press-releases/lapicque-louis
942. Davis H. (1923). The relationship of the “Chronaxie” of muscle to the size of the stimulating electrode / Journal of Physiology, Vol. 57, pp. 81–82.
943. Rushton W. A. H. (1935). The time factor in electrical excitation / Biological Reviews, Vol. 10, Iss. 1, pp. 1–17 // https://doi.org/10.1111/j.1469–185X.1935.tb00474.x
944. Tasaki I. (2012). Physiology and Electrochemistry of Nerve Fibers. Elsevier // https://books.google.ru/books?id=3ttzcDBIwRIC
945. Monnier A. M. (2008). Lapicque, Louis / Complete Dictionary of Scientific Biography // https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesaurus-es-pictures-and-press-releases/lapicque-louis
946. Lapicque L., Gaultier P. (1943). La machine nerveuse. (Flammarion) réédition numérique FeniXX // https://books.google.ru/books?id=r2q-JDwAAQBAJ
947. Mazliak L., Shafer G. (2011). What Does the Arrest and Release of Emile Borel and His Colleagues in 1941 Tell Us about the German Occupation of France? / Science in Context, Vol. 24, Iss. 4, pp. 587–623, December 2011 // https://doi.org/10.1017/S0269889711000238
948. Peltier C. Louis Édouard Lapicque (1866–1952) // http://www.charleslapicque.fr/a-propos-de/biographie/biographie-detaillee/resources/pdf/Louis_Lapicque.pdf
949. Lykknes A., Opitz D. L., Van Tiggelen B. (2012). For Better or For Worse? Collaborative Couples in the Sciences. Science Networks. Historical Studies. Springer Basel // https://books.google.ru/books?id=yRofPFFbKqsC
950. Abbott L. F. (1997). Lapicque’s introduction of the integrate-and-fire model neuron / Brain Research Bulletin, Vol. 50, Iss. 5–6, November — December 1999, pp. 303–304 // https://doi.org/10.1016/S0361–9230(99)00161–6
951. Liang P., Wu S., Gu F. (2015). An Introduction to Neural Information Processing. Springer Netherlands // https://books.google.ru/books?id=X-FZECwAAQBAJ
952. Calvo P., Gomila T. (2008). Handbook of Cognitive Science: An Embodied Approach. Elsevier Science // https://books.google.ru/books?id=jxnhqHu03gQC
953. Brunel N., van Rossum M. C. W. (2007). Lapicque’s 1907 paper: from frogs to integrate-and-fire / Biological Cybernetics, Vol. 97, pp. 337–339 // https://doi.org/10.1007/s00422–007–0190–0
954. Adrian E. D. (1932). Nobel Lecture, December 12, 1932 // https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1932/adrian/lecture/
955. Finger S. (2004). Minds behind the Brain: A History of the Pioneers and Their Discoveries. Ox-

ford University Press // https://books.google.ru/books?id=3OWU1wnOy84C
956. Bowditch H. P (1871). Über die Eigenthümlichkeiten der Reizbarkeit, welche die Muskelfasern des Herzens zeigen / Arbeiten aus der Physiologischen Anstalt zu Leipzig // https://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHOdocuView?url=/permanent/vlp/lit1387/index.meta
957. Rosenblueth A. (1935). The All-or-None Principle and the Nerve Effector Systems / The Quarterly Review of Biology, Vol. 10, No. 3, pp. 334–340 // https://doi.org/10.1086/394489
958. Lucas K. (1905). On the gradation of activity in a skeletal muscle-fibre / The Journal of Physiology, Vol. 33, Iss. 2, pp. 125–137 // https://doi.org/10.1113/jphysiol.1905.sp001115
959. Lucas K. (1909). The “all-or-none” contraction of the amphibian skeletal muscle fibre / The Journal of Physiology, Vol. 38, Iss. 2–3, pp. 113–133 // https://doi.org/10.1113/jphysiol.1909.sp001298
960. Smith D. L. (1963). Basic Concepts in Physiology: II. Keith Lucas and the Nerve-Muscle Response / The American Biology Teacher, Vol. 25, Iss. 8, pp. 610–615 // https://doi.org/10.2307/4440465
961. Finger S. (2004). Minds behind the Brain: A History of the Pioneers and Their Discoveries. Oxford University Press // https://books.google.ru/books?id=3OWU1wnOy84C
962. Piccolino M. (2003). Nerves, alcohol and drugs, the Adrian–Kato controversy on nervous conduction: deep insights from a “wrong” experiment? / Brain Research Reviews, Vol. 43, Iss. 3, pp. 257–265 // https://doi.prg/10.1016/j.brainresrev.2003.08.006
963. Adrian E. D. (1932). Nobel Lecture, December 12, 1932 // https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1932/adrian/lecture/
964. Finger S. (2004). Minds behind the Brain: A History of the Pioneers and Their Discoveries. Oxford University Press // https://books.google.ru/books?id=3OWU1wnOy84C
965. Piccolino M., Bresadola M. (2013). Shocking Frogs: Galvani, Volta, and the Electric Origins of Neuroscience. Oxford University Press // https://books.google.ru/books?id=_VYGAQAAQBAJ
966. Lucas K., Adrian E. D. (1917). The Conduction of the Nervous Impulse. Longmans, Green and Company // https://books.google.ru/books?id=fNVOAAAAMAAJ
967. Cowan W. M., Südhof T. C., Stevens C. P. (2003). Synapses. JHU Press // https://books.google.ru/books?id=FO5efrKGVQoC
968. Finger S. (2004). Minds behind the Brain: A History of the Pioneers and Their Discoveries. Oxford University Press // https://books.google.ru/books?id=3OWU1wnOy84C
969. Gasser H. S., Newcomer H. S. (1921). Physiological action currents in the phrenic nerve. An application of the thermionic vacuum tube to nerve physiology / The American Journal of Physiology, Vol. 57, Iss. 1, pp. 1–26 // https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1921.57.1.1
970. Павлов А. 5 июля 1888 г. / Critical: Сайт медицины критических состояний. Календарь // https://www.critical.ru/calendar/0507gasser.htm
971. Gasser H. S., Erlanger J. (1929). Role of size in establishment of nerve block by pressure or cocaine / The American Journal of Physiology, Vol. 88, pp. 581–589.
972. Piccolino M. (2003). Nerves, alcohol and drugs, the Adrian–Kato controversy on nervous conduction: deep insights from a “wrong” experiment? / Brain Research Reviews, Vol. 43, Iss. 3, pp. 257–265 // https://doi.prg/10.1016/j.brainresrev.2003.08.006
973. Kato G.-I. (1970). The road a scientist followed. Notes of Japanese Physiology as I myself experienced it / Annual Review of Physiology, 1970, Vol. 32, pp. 1–22 // https://doi.org/10.1146/annurev.ph.32.030170.000245
974. Adrian E. D. (1932). Nobel Lecture, December 12, 1932 // https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1932/adrian/lecture/
975. The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1944. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2020, 30 Oct 2020 // https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1944/summary/
976. Piccolino M. (2003). Nerves, alcohol and drugs, the Adrian–Kato controversy on nervous conduction: deep insights from a “wrong” experiment? / Brain Research Reviews, Vol. 43, Iss. 3, pp. 257–265 // https://doi.prg/10.1016/j.brainresrev.2003.08.006
977. Finger S. (2004). Minds behind the Brain: A History of the Pioneers and Their Discoveries. Oxford University Press // https://books.google.ru/books?id=3OWU1wnOy84C
978. Сандаков Д. Б. (2011). Возбуждение и его механизмы / Электронный учебник по курсу «Физиология человека и животных» // http://www.bio.bsu.by/phha/01/01_text.html
979. Сазонов В. Ф. (2011). Функциональная классификация мембранных ионных каналов / Научные труды III Съезда физиологов СНГ. — М.: Медицина-Здоровье. С. 72 // http://www.physiology-cis.org/files/YA2011_Proceedings.pdf

980. Сазонов В. Ф. (2017). Ионные каналы мембраны / Кинезиолог // http://kineziolog.bodhy.ru/content/ionnye-kanaly-membrany
981. Zangari A., Micheli D., Galeazzi R., Tozzi A. (2018). Node of Ranvier as an Array of Bio-Nanoantennas for Infrared Communication in Nerve Tissue / Scientific Reports, Vol. 8, p. 539 // https://doi.org/10.1038/s41598–017–18866-x
982. Castelfranco A. M., Hartline D. K. (2015). The evolution of vertebrate and invertebrate myelin: a theoretical computational study / Journal of Computational Neuroscience, Vol. 38, pp. 521–538 // https://doi.org/10.1007/s10827–015–0552-x
983. Hodgkin A. L., Huxley A. F. (1952). A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve / The Journal of Physiology, 117 (4): 500–44 // https://doi.org/10.1113%2Fjphysiol.1952.sp004764
984. Forrest M. D. (2014). Can the Thermodynamic Hodgkin–Huxley Model of Voltage-Dependent Conductance Extrapolate for Temperature? / Computation, Vol. 2, Iss. 2, pp. 47–60 // https://doi.org/10.3390%2Fcomputation2020047
985. Pakdaman K., Thieullen M., Wainrib G. (2010). Fluid limit theorems for stochastic hybrid systems with applications to neuron models / Advances in Applied Probability, Vol. 42, Iss. 3, pp. 761–794 // https://doi.org/10.1239/aap/1282924062
986. Zheng Q., Wei G. W. (2011). Poisson-Boltzmann-Nernst-Planck model / Journal of Chemical Physics, 134 (19): 194101 // https://doi.org/10.1063%2F1.3581031
987. Tai-Chia Lin T.-C. (2011). The Poisson-Nernst-Planck (PNP) system for ion transport (PNP) system for ion transport / 3rd OCAMI-TIMS Workshop in Japan, Osaka, March 13–16, 2011 // http://www.sci.osaka-cu.ac.jp/~ohnita/2010/TCLin.pdf
988. Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S. (1962). An active pulse transmission line simulating nerve axon / Proceedings of the IRE, Vol. 50, pp. 2061–2070 // https://ieeexplore.ieee.org/document/4066548
989. Izhikevich E. M. (2003). Simple model of spiking neurons / IEEE transactions on neural networks, Vol. 14, No. 6, November 2003 // http://www.rctn.org/vs265/izhikevich-nn03.pdf
990. MacGregor R. (2012). Neural and Brain Modeling. Elsevier // https://books.google.ru/books?id=ovOiz7Ztx10C
991. Briggman K. L., Helmstaedter M., Denk W. (2011). Wiring specificity in the direction-selectivity circuit of the retina / Nature, Vol. 471, Iss. 7337, pp. 183–188 // https://doi.org/10.1038/nature09818
992. Kim J. S., Greene M. J., Zlateski A., Lee K., Richardson M., Turaga S. C., Purcaro M., Balkam M., Robinson A., Behabadi B. F., Campos M., Denk W., Seung H. S. (2014). Space–time wiring specificity supports direction selectivity in the retina / Nature, Vol. 509, Iss. 7500, pp. 331–336 // https://doi.org/10.1038%2Fnature13240
993. Коровски Ю. (2015). Игры ради науки / XX2 век, 23 марта // https://22century.ru/popular-science-publications/games-for-science
994. Zlateski A., Lee K., Seung H. S. (2017). Scalable training of 3D convolutional networks on multi- and many-cores / Journal of Parallel and Distributed Computing, Vol. 106, pp. 195–204 // https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2017.02.006
995. Alivisatos P. A., Chun M., Church G. M., Greenspan R. J., Roukes M. L., Yuste R. (2012). The Brain Activity Map Project and the Challenge of Functional Connectomics / Neuron, Vol. 74, Iss. 6, pp. 970–974, June 21, 2012 // https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.06.006
996. Jürgens K. D. (2002). Etruscan shrew muscle: the consequences of being small. The Journal of Experimental Biology. 205 (Pt 15): 2161–2166 // https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12110649
997. Alivisatos P. A., Chun M., Church G. M., Greenspan R. J., Roukes M. L., Yuste R. (2012). The Brain Activity Map Project and the Challenge of Functional Connectomics / Neuron, Vol. 74, Iss. 6, pp. 970–974, June 21, 2012 // https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.06.006
998. White J. G., Southgate E., Thomson J. N., Brenner S. (1986). The structure of the nervous system of the nematode Caenorhabditis elegans / Philosophical Transactions of the Royal Society B, Vol. 314, Iss. 1165, 12 November 1986, pp. 1–340 // https://doi.org/10.1098/rstb.1986.0056
999. Ryan R., Lu Z., Meinertzhagen I. A. (2016). The CNS connectome of a tadpole larva of Ciona intestinalis (L.) highlights sidedness in the brain of a chordate sibling / eLife 2016; 5: e16962 // https://doi.org/10.7554/eLife.16962
1000. DeWeerdt S. (2019). How to map the brain / Nature, Vol. 571, S6-S8, 24 July 2019 // https://www.nature.com/articles/d41586–019–02208–0
1001. Cook S. J., Jarrell T. A., Brittin C. A., Wang Y., Bloniarz A. E., Yakovlev M. A., Nguyen K. C. Q., Tang L. T.-H., Bayer E. A., Duerr J. S., Bülow H. E., Hobert O., Hall D. H., Emmons S. W. (2019). Whole-animal connectomes of both Caenorhabditis elegans sexes / Nature, Vol. 571, pp. 63–71 // https://doi.org/10.1038/s41586–019–1352–7

1002. Zheng Z., Lauritzen J. S., Perlman E., Robinson C. G., Nichols M., Milkie D., Torrens O., Price J., Fisher C. B., Sharifi N., Calle-Schuler S. A., Kmecova L., Ali I. J., Karsh B., Trautman E. T., Bogovic J. A., Hanslovsky P., Jefferis G. S. X. E., Kazhdan M., Khairy K., Saalfeld S., Fetter R. D., Bock D. D. A Complete Electron Microscopy Volume of the Brain of Adult Drosophila melanogaster / Cell, Vol. 174, Iss. 3, pp. 730–743.E22, July 26, 2018 // https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.06.019
1003. Li P. H., Maitin-Shepard J. (2019). An Interactive, Automated 3D Reconstruction of a Fly Brain / Google AI Blog, August 5, 2019 // https://ai.googleblog.com/2019/08/an-interactive-automated-3d.html
1004. Li P. H., Lindsey L. F., Januszewski M., Zheng Z., Bates A. S., Taisz I., Tyka M., Nichols M., Li F., Perlman E., Maitin-Shepard J., Blakely T., Leavitt L., Jefferis G. S. X. E., Bock D., Jain V. (2019). Automated Reconstruction of a Serial-Section EM Drosophila Brain with Flood-Filling Networks and Local Realignment // https://doi.org/10.1101/605634
1005. Jain V., Januszewski M. (2018). Improving Connectomics by an Order of Magnitude / Google AI Blog, July 16, 2018 // https://ai.googleblog.com/2018/07/improving-connectomics-by-order-of.html
1006. Blakely T. (2021). A Browsable Petascale Reconstruction of the Human Cortex / Google AI Blog, June 1, 2021 // https://ai.googleblog.com/2021/06/a-browsable-petascale-reconstruction-of.html
1007. Shapson-Coe A., Januszewski M., Berger D. R., Pope A., Wu Y., Blakely T., Schalek R. L., Li P., Wang S., Maitin-Shepard J., Karlupia N., Dorkenwald S., Sjostedt E., Leavitt L., Lee D., Bailey L., Fitzmaurice A., Kar R., Field B., Wu H., Wagner-Carena J., Aley D., Lau J., Lin Z., Wei D., Pfister H., Peleg A., Jain V., Lichtman J. W. (2021). A connectomic study of a petascale fragment of human cerebral cortex // https://doi.org/10.1101/2021.05.29.446289
1008. Explore H01: One cubic millimeter of the human cerebral cortex (2021) // https://h01-release.storage.googleapis.com/explore.html
1009. Wilhelm B. G., Mandad S., Truckenbrodt S., Kröhnert K., Schäfer C., Rammner B., Koo S. J., Claßen G. A., Krauss M., Haucke V., Urlaub H., Rizzoli S. O. (2014). Composition of isolated synaptic boutons reveals the amounts of vesicle trafficking proteins / Science, Vol. 344, Iss. 6187, pp. 1023–1028 // https://doi.org/10.1126/science.1252884
1010. Doerr A. (2014). Modeling the synapse / Nature Methods, Vol. 11, pp. 788–789 // https://doi.org/10.1038/nmeth.3057
1011. Jolivet R., Coggan J. S., Allaman I., Magistretti P. J. (2015). Multi-timescale Modeling of Activity-Dependent Metabolic Coupling in the Neuron-Glia-Vasculature Ensemble / PLOS Computational Biology, February 26, 2015 // https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004036
1012. de Ceglia R., Ledonne A., Litvin D. G., Lind B. L., Carriero G., Latagliata E. C., Bindocci E., Di Castro M. A., Savtchouk I., Vitali I., Ranjak A., Congiu M., Canonica T., Wisden W., Harris K., Mameli M., Mercuri N., Telley L., Volterra A. (2023). Specialized astrocytes mediate glutamatergic gliotransmission in the CNS / Nature, Vol. 262, 06 September 2023 // https://doi.org/10.1038/s41586–023–06502-w
1013. DeWeerdt S. (2019). How to map the brain / Nature, Vol. 571, S6-S8, 24 July 2019 // https://www.nature.com/articles/d41586–019–02208–0
1014. OpenWorm foundation (2022). OpenWorm // https://openworm.org/
1015. Haspel G., Boyden E. S., Brown J., Church G., Cohen N., Fang-Yen C., Flavell S., Goodman M. B., Hart A. C., Hobert O., Kagias K., Lockery S., Lu Y., Marblestone A., Matelsky J., Pfister H., Rotstein H. G., Scholz M., Shlizerman E., Simeon Q., Skuhersky M. A., Venkatachalam V., Yang G. R., Yemini E., Zimmer M., Kording K. P. (2023). To reverse engineer an entire nervous system // https://arxiv.org/abs/2308.06578
1016. Сегеда Г. (2022). Цифровой двойник головастика — ещё один шаг на пути к искусственному разуму? / Наука в Сибири, 31 янв. // https://sbras.info/articles/nauka-dlya-obschestva/cifrovoy-dvoynik-golovastika-esche-odin-shag-na-puti-k
1017. Ferrario A., Palyanov A., Koutsikou S., Li W., Soffe S., Roberts A., Borisyuk R. (2021). From decision to action: Detailed modelling of frog tadpoles reveals neuronal mechanisms of decision-making and reproduces unpredictable swimming movements in response to sensory signals / PLOS Computational Biology, December 13, 2021 // https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009654
1018. McCulloch W. S., Pitts W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity / Bulletin of Mathematical Biophysics, 5: 115 // https://doi.org/10.1007/BF02478259
1019. Heims S. J. (1991). Describing “Embodiments of mind”: McCulloch and his cohorts / Chrisley R., Begeer S. (2000). Artificial Intelligence: Critical

Concepts. Routledge // https://books.google.ru/books?id=dLQ3bDy2tgYC
1020. Conway F., Siegelman J. (2009). Dark Hero of the Information Age: In Search of Norbert Wiener, The Father of Cybernetics. Basic Books // https://books.google.ru/books?id=u_w4DgAAQBAJ
1021. Gefter A. (2015). The Man Who Tried to Redeem the World with Logic: Walter Pitts rose from the streets to MIT, but couldn't escape himself / Nautilus, February 5, 2015 // https://nautil.us/the-man-who-tried-to-redeem-the-world-with-logic-235253/
1022. Arbib M. A. (2016). Foreword to the 2016 reussue / McCulloch W. S., Papert S. (2016). Embodiments of Mind. MIT Press // https://books.google.ru/books?id=ITxMDQAAQBAJ
1023. Conway F., Siegelman J. (2009). Dark Hero of the Information Age: In Search of Norbert Wiener, The Father of Cybernetics. Basic Books // https://books.google.ru/books?id=u_w4DgAAQBAJ
1024. Abraham T. H. (2002). (Physio)logical circuits: The intellectual origins of the McCulloch-Pitts neural networks / Journal of the History of the Behavioral Sciences, Vol. 38, Iss. 1, pp. 3–25 // https://doi.org/10.1002/jhbs.1094
1025. Shmailov M. M. (2012). Intellectual Pursuits of Nicolas Rashevsky. The Queer Duck of Biology // https://books.google.ru/books?id=usHsDAAAQBAJ
1026. Орехова К. В. (2010). Дворянский Род Ржевских в Дзержинске / Городской журнал Светский в Дзержинске // http://www.svetsky.com/dvoryanskoe-gnezdo-dzerzhinska/dvoryanskii-rod-rzhevskikh-v-dzerzhinske
1027. Модзалевский В. Л. (2012). Малороссийский родословник. Т. 4. С. 220–432 // https://books.google.ru/books?id=OuaWBgAAQBAJ
1028. Shmailov M. M. (2012). Intellectual Pursuits of Nicolas Rashevsky. The Queer Duck of Biology // https://books.google.ru/books?id=usHsDAAAQBAJ
1029. Рашевский Н. П. (1920). Н. П. Рашевский — В. И. Вернадскому. № 706, 23 октября 1920 / Вернадський В. І. (2012). Вибрані наукові праці академіка В. І. Вернадського. Т. 2: Володимир Іванович Вернадський. Листування з українськими вченими.
1030. Невзорова И. М. (2007). Таврида в изгнании / «Серебряный век» в Крыму: взгляд из XXI столетия. Материалы Четвёртых Герцыковских чтений в г. Судаке 6–10 июня 2005 года.
1031. Shmailov M. M. (2012). Intellectual Pursuits of Nicolas Rashevsky. The Queer Duck of Biology // https://books.google.ru/books?id=usHsDAAAQBAJ
1032. Harman O., Dietrich M. R. (2012). Outsider Scientists: Routes to Innovation in Biology. University of Chicago Press // https://books.google.ru/books?id=yffPAQAAQBAJ
1033. Nicolas Rashevsky / Worddisk // https://www.worddisk.com/wiki/Nicholas_Rashevsky/
1034. Shmailov M. M. (2012). Intellectual Pursuits of Nicolas Rashevsky. The Queer Duck of Biology // https://books.google.ru/books?id=usHsDAAAQBAJ
1035. Shmailov M. M. (2012). Intellectual Pursuits of Nicolas Rashevsky. The Queer Duck of Biology // https://books.google.ru/books?id=usHsDAAAQBAJ
1036. Rashevsky N. P. (1924). Is Time the Fourth Dimension? / Scientific American, Vol. 131, Iss. 6 // https://www.scientificamerican.com/article/is-time-the-fourth-dimension/
1037. Current Opinion, Vol. 78, 1924, p. 78.
1038. Shmailov M. M. (2012). Intellectual Pursuits of Nicolas Rashevsky. The Queer Duck of Biology // https://books.google.ru/books?id=usHsDAAAQBAJ
1039. Rosen R. (1991). Life Itself: A Comprehensive Inquiry Into the Nature, Origin, and Fabrication of Life. Columbia University Press // https://books.google.ru/books?id=DR8L4snDnkIC
1040. Shmailov M. M. (2012). Intellectual Pursuits of Nicolas Rashevsky. The Queer Duck of Biology // https://books.google.ru/books?id=usHsDAAAQBAJ
1041. Anderson J., Rosenfeld E. (2000). Talking Nets: An Oral History of Neural Networks. New York, NY, USA: MIT Press // https://books.google.ru/books?id= –l-yim2lNRUC
1042. Shmailov M. M. (2012). Intellectual Pursuits of Nicolas Rashevsky. The Queer Duck of Biology // https://books.google.ru/books?id=usHsDAAAQBAJ
1043. Abraham T. H. (2004). Nicolas Rashevsky's Mathematical Biophysics / Journal of the History of Biology, Vol. 37, Iss. 2, pp. 333–385 // https://doi.org/10.1023/b: hist.0000038267.09413.0d
1044. Conway F., Siegelman J. (2009). Dark Hero of the Information Age: In Search of Norbert Wiener, The Father of Cybernetics. Basic Books // https://books.google.ru/books?id=u_w4DgAAQBAJ
1045. Gefter A. (2015). The Man Who Tried to Redeem the World with Logic: Walter Pitts rose from the streets to MIT, but couldn't escape himself / Nautilus, February 5, 2015 // http://nautil.us/issue/21/information/the-man-who-tried-to-redeem-the-world-with-logic
1046. Day Staff Writer (2009). Old Lyme family looks to future of land with guidance from past / The Day,

published March 13.2000, updated December 29, 2009 // https://www.theday.com/article/20000313/DAYARC/303139970
1047. Malapi-Nelson A. (2017). The Nature of the Machine and the Collapse of Cybernetics: A Transhumanist Lesson for Emerging Technologies. Palgrave Studies in the Future of Humanity and its Successors. Springer International Publishing // https://books.google.ru/books?id= –gorDwAAQBAJ
1048. Levine Y. (2019). Surveillance Valley: The Secret Military History of the Internet. Icon Books Limited // https://books.google.ru/books?id=Rph5DwAAQBAJ
1049. Levine Y. (2019). Surveillance Valley: The Secret Military History of the Internet. Icon Books Limited // https://books.google.ru/books?id=Rph5DwAAQBAJ
1050. Joby Milo A. (1994). In Eves' circles. MAA notes 34. Mathematical Association of America // https://books.google.ru/books?id=CNzuAAAAMAAJ
1051. Chang S. (2011). Academic Genealogy of Mathematicians. World Scientific // https://books.google.ru/books?id=4siw31DPONUC
1052. Powell A. B., Frankenstein M. (2000). Remembering Dirk Jan Struik, 1894–2000 // https://www.maa.org/news/remembering-dirk-jan-struik-1894–2000
1053. Chang S. (2013). The Secret Guide to Computers. Springer Science & Business Media // https://books.google.ru/books?id=gMYGCAAAQBAJ
1054. Hardesty L. (2011). The Original Absent-Minded Professor / MIT Technology Review, Jun 21, 2011 // https://www.technologyreview.com/s/424363/the-original-absent-minded-professor/
1055. Gefter A. (2015). The Man Who Tried to Redeem the World with Logic: Walter Pitts rose from the streets to MIT, but couldn't escape himself / Nautilus, February 5, 2015 // http://nautil.us/issue/21/information/the-man-who-tried-to-redeem-the-world-with-logic
1056. Priestley M. (2011). A Science of Operations: Machines, Logic and the Invention of Programming. Springer London // https://books.google.ru/books?id=uflVo_q-FEUC
1057. Gefter A. (2015). The Man Who Tried to Redeem the World with Logic: Walter Pitts rose from the streets to MIT, but couldn't escape himself / Nautilus, February 5, 2015 // http://nautil.us/issue/21/information/the-man-who-tried-to-redeem-the-world-with-logic
1058. Rosenblueth A., Wiener N., Bigelow J. (1943). Behavior, Purpose and Teleology / Philosophy of Science, 1943, Vol. 10, No. 1, pp. 18–24 // https://doi.org/10.1086/286788
1059. Masani P. R. (1990). Norbert Wiener 1894–1964. Vita Mathematica. Birkhäuser // https://books.google.ru/books?id=TpT_GfMId-sC
1060. The Coalescence of Cybernetics / American Society for Cybernetics: Foundations: History of Cybernetics // http://www.asc-cybernetics.org/foundations/history2.htm
1061. Kline R. R. (2015). The Cybernetics Moment: Or Why We Call Our Age the Information Age. New Studies in American Intellectual and Cultural History. JHU Press // https://books.google.ru/books?id=NQPHCQAAQBAJ
1062. Josiah Macy, Jr. Foundation (1960). A review of activities, 1956–1960. New York: Josiah Macy, Jr. Foundation, p. 7 // https://books.google.ru/books/about/Josiah_Macy_Jr_Foundation.html?id=shJrAAAAMAAJ
1063. Шутина Ю. (2017). Год разоблачения сенсаций. Главные открытия и достижения археологов в 2016 г. / Meduza, 5 янв. // https://meduza.io/feature/2017/01/05/god-razoblacheniya-sensatsiy
1064. von Neumann J. (1945). First Draft of a Report on the EDVAC. Moore School of Electrical Engineering. University of Pennsylvania / IEEE Annals of the History of Computing, vol. 15, No. 1, 1993 // http://web.mit.edu/STS.035/www/PDFs/edvac.pdf
1065. Gefter A. (2015). The Man Who Tried to Redeem the World with Logic: Walter Pitts rose from the streets to MIT, but couldn't escape himself / Nautilus, February 5, 2015 // http://nautil.us/issue/21/information/the-man-who-tried-to-redeem-the-world-with-logic
1066. Moye W. T. (1996). ENIAC: The Army-Sponsored Revolution. United States Army Research Laboratory // http://ftp.arl.army.mil/mike/comphist/96summary/index.html
1067. Gefter A. (2015). The Man Who Tried to Redeem the World with Logic: Walter Pitts rose from the streets to MIT, but couldn't escape himself / Nautilus, February 5, 2015 // http://nautil.us/issue/21/information/the-man-who-tried-to-redeem-the-world-with-logic
1068. Smalheiser N. (2000). Walter Pitts / Perspectives in biology and medicine, 43, pp. 217–226 // https://doi.org/10.1353/pbm.2000.0009
1069. Kline R. (2015). The Cybernetics Moment: Or Why We Call Our Age the Information Age. Johns

Hopkins University Press // https://books.google.ru/books?id=WgPHCQAAQBAJ
1070. Soni J., Goodman R. (2017). A Mind at Play: How Claude Shannon Invented the Information Age. Simon & Schuster // https://books.google.ru/books?id=ABlpDQAAQBAJ
1071. Smalheiser N. (2000). Walter Pitts / Perspectives in biology and medicine, 43, pp. 217–226 // https://doi.org/10.1353/pbm.2000.0009
1072. Gefter A. (2015). The Man Who Tried to Redeem the World with Logic: Walter Pitts rose from the streets to MIT, but couldn't escape himself / Nautilus, February 5, 2015 // http://nautil.us/issue/21/information/the-man-who-tried-to-redeem-the-world-with-logic
1073. Malapi-Nelson A. (2017). The Nature of the Machine and the Collapse of Cybernetics: A Transhumanist Lesson for Emerging Technologies. Palgrave Studies in the Future of Humanity and its Successors. Springer International Publishing // https://books.google.ru/books?id= –gorDwAAQBAJ
1074. Gefter A. (2015). The Man Who Tried to Redeem the World with Logic: Walter Pitts rose from the streets to MIT, but couldn't escape himself / Nautilus, February 5, 2015 // https://nautil.us/the-man-who-tried-to-redeem-the-world-with-logic-235253/
1075. Franchi S., Bianchini F. (2011). The Search for a Theory of Cognition: Early Mechanisms and New Ideas. Rodopi // https://books.google.ru/books?id=aRzSxoJse-oC
1076. Malapi-Nelson A. (2017). The Nature of the Machine and the Collapse of Cybernetics: A Transhumanist Lesson for Emerging Technologies. Palgrave Studies in the Future of Humanity and its Successors. Springer International Publishing // https://books.google.ru/books?id= –gorDwAAQBAJ
1077. McCulloch W. S., Pitts W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity / Bulletin of Mathematical Biophysics, 5: 115 // https://doi.org/10.1007/BF02478259
1078. Kleene S. (1951). Representation of events in nerve nets and finite automata // https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_memoranda/2008/RM704.pdf
1079. McCulloch W. S., Pitts W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity / Bulletin of Mathematical Biophysics, 5: 115 // https://doi.org/10.1007/BF02478259
1080. von Neumann J. (1951). The General and Logical Theory of Automata / Jeffress L. A. (1951). Cerebral Mechanisms in Behavior: The Hixon Symposium. Wiley. New York // https://books.google.ru/books?id=0vgMAAAAIAAJ
1081. Rosenblatt F. (1961). Principles of Neurodynamics. Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms. Cornell aeronautical lab inc., Buffalo, New York. Defense Technical Information Center // https://books.google.ru/books?id=Tk2tDAEACAAJ
1082. Piccinini G. (2004). The First Computational Theory of Mind and Brain: A Close Look at Mcculloch and Pitts's "Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity" / Synthese, Vol. 141 (2) // https://doi.org/10.1023/B:SYNT.0000043018.52445.3e
1083. Kleene S. (1951). Representation of events in nerve nets and finite automata // https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_memoranda/2008/RM704.pdf
1084. Pierpoint N. (2009). Why are regular expressions called "regular" expressions? / StackOverflow, Jun 10 '09 // https://stackoverflow.com/questions/975465/why-are-regular-expressions-called-regular-expressions
1085. Wright P. (2012). Why is a regular language called 'regular'? / StackExchange, May 10 '12 // https://cs.stackexchange.com/questions/1771/why-is-a-regular-language-called-regular/1772
1086. Weller T. (2016). How did Regex get its name? / StackExchange, Mar 9 '16 // https://ell.stackexchange.com/questions/83917/how-did-regex-get-its-name
1087. Piccinini G. (2004). The First Computational Theory of Mind and Brain: A Close Look at Mcculloch and Pitts's "Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity" / Synthese, Vol. 141 (2) // https://doi.org/10.1023/B:SYNT.0000043018.52445.3e
1088. Kleene S. (1951). Representation of events in nerve nets and finite automata // https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_memoranda/2008/RM704.pdf
1089. Rosenblatt F. (1961). Principles of Neurodynamics. Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms. Cornell aeronautical lab inc., Buffalo, New York. Defense Technical Information Center // https://books.google.ru/books?id=Tk2tDAEACAAJ
1090. Landahl H. D., McCulloch W. S., Pitts W. (1943). A statistical consequence of the logical calculus of nervous nets. The Bulletin of Mathematical Biophysics, 5(4), 135–137 // https://doi.org/10.1007/bf02478260
1091. Turing A. (1946). Turing Letter to W. Ross Ashby // http://www.rossashby.info/letters/turing.html

1092. Copeland B. J. (2012). Alan Turing's Electronic Brain: The Struggle to Build the ACE, the World's Fastest Computer. OUP Oxford // https://books.google.ru/books?id=YhQZnczOS7kC
1093. Turing A. (1948). Intelligent Machinery // http://www.alanturing.net/intelligent_machinery/
1094. Gabbay D., Woods J., Thagard P. (2006). Philosophy of Psychology and Cognitive Science. Handbook of the Philosophy of Science. Elsevier Science // https://books.google.ru/books?id=Lp93PtrvMoMC
1095. Turing A. (1948). Intelligent Machinery // http://www.alanturing.net/intelligent_machinery/
1096. Shimbel A., Rapoport A. (1948). A statistical approach to the theory of the central nervous system. The Bulletin of Mathematical Biophysics, 10(1), 41–55 // https://doi.org/10.1007/bf02478329
1097. Hebb D. (1949). The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory. A Wiley book in clinical psychology. Wiley // https://books.google.ru/books?id=dZoeDiLTwuEC
1098. Thorndike E. L., Bruce D. (1970). Animal Intelligence: Experimental Studies. Transaction Publishers // https://books.google.ru/books?id=-G08XozILUJYC
1099. Thorndike E. L. (1932). The Fundamentals Of Learning. Teachers College, Columbia University // https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.157080/page/n29
1100. Thorndike E. L. (1911). Animal intelligence: experimental studies. Animal behavior series. New York, The Macmillan Company // https://doi.org/10.5962/bhl.title.55072
1101. Майоров Ф. П. (1948). История учения об условных рефлексах. — М.: Академия Медицинских наук СССР // http://anfiz.ru/books/item/f00/s00/z0000021/index.shtml
1102. Pavlov I. P., Anrep G. V. (1927). Conditioned reflexes: an investigation of the physiological activity of the cerebral cortex. Oxford university press: Humphrey milford // https://books.google.ru/books?id=aGMSyQEACAAJ
1103. Hoggett R. (2009). 1951 — SNARC Maze Solver — Minsky / Edmonds (American) / cyberneticzoo.com: a history of cybernetic animals and early robots // http://cyberneticzoo.com/mazesolvers/1951-maze-solver-minsky-edmonds-american/
1104. Bernstein J. (1981). A.I / The New Yorker, December 6, 1981 // https://www.newyorker.com/magazine/1981/12/14/a-i
1105. Klein D. (2018). Mighty mouse / MIT Technology Review, December 19, 2018 // https://www.technologyreview.com/2018/12/19/138508/mighty-mouse/
1106. Cannon W. B. (1932). The Wisdom of the Body, Vol. 10. W. W. Norton, Incorporated // https://books.google.ru/books?id=zdkEAQAAIAAJ
1107. Pfeiffer J. E. (1949). The Stuff That Dreams Are Made On; CYBERNETICS: Or Control and Communication in the Animal and the Machine. By Norbert Wiener. 191 pp. New York: John Wiley & Sons / The New York Times, Jan. 23, 1949 // https://www.nytimes.com/1949/01/23/archives/the-stuff-that-dreams-are-made-on-cybernetics-or-control-and.html
1108. Science: The Thinking Machine (1949) / Time, Monday, Jan. 24, 1949 // http://content.time.com/time/subscriber/article/0,33009,799721,00.html
1109. Ashby W. R. (1960). Design for a Brain. The origin of adaptive behaviour. Second edition. Springer Netherlands // https://books.google.ru/books?id=QsIXAAAAMAAJ
1110. Ashby W. R. (1949). The Electronic Brain / Radio-Electronics, Mar. 1949 // http://www.rossashby.info/gallery/Radio%20Electronics%20March%201949%20The%20Electronic%20Brain.pdf
1111. Ashby W. R. (1948). Design for a Brain / Electronic Engineering, Vol. 20, pp. 379–383.
1112. Pickering A. (2009). Psychiatry, synthetic brains and cybernetics in the work of W. Ross Ashby / International Journal of General Systems, Vol. 38, Iss. 2, pp. 213–230 // https://doi.org/10.1080/03081070802712025
1113. Rid T. (2016). Rise of the Machines: A Cybernetic History. W. W. Norton & Company // https://books.google.ru/books?id=WByZCgAAQBAJ
1114. Рид Т. (2020). Рождение машин. Неизвестная история кибернетики / Пер. с англ. Е. Васильченко, Е. Кузьмина. Litres // https://books.google.ru/books?id=0CCNDwAAQBAJ
1115. Cariani P. A. (2009). The homeostat as embodiment of adaptive control / International Journal of General Systems, Vol. 38, No. 2, pp. 139–154 // https://doi.org/ 10.1080/03081070802633593
1116. Pickering A. (2002). Cybernetics And The Mangle: Ashby, Beer And Pask / Social Studies of Science, Vol. 32, Iss. 3 // https://doi.org/10.1177/0306312702032003003
1117. Pilcher H. (1948). 390625 thoughts. The clicking brain is clever than man's / Daily Herald, No. 10227, Dec. 13, 1948 // https://www.britishnewspaperarchive.co.uk/viewer/BL/0000681/19481213/001/0001
1118. Pias C., Foerster G. v. (2016). Cybernetics: The Macy Conferences 1946–1953: The Complete Transactions. The University of Chicago Press // https://books.google.ru/books?id=zOincQAACAAJ

1119. Boden M. A. (2006). Mind as Machine: A History of Cognitive Science. Oxford University Press // https://books.google.ru/books?id=b4SE3C8PYU0C
1120. Boden M. A. (2006). Grey Walter's Anticipatory Tortoises / The Rutherford Journal, Vol. 2, 2006–2007 // http://www.rutherfordjournal.org/article020101.html
1121. Marsh A. (2020). Meet the Roomba's Ancestor: The Cybernetic Tortoise / IEEE Spectrum, 28 Feb 2020 // https://spectrum.ieee.org/tech-history/space-age/meet-roombas-ancestor-cybernetic-tortoise
1122. Марш А. (2020). Познакомьтесь с кибернетической черепахой, предшественником Roomba / Пер. с англ. Голованов А. / Хабр, 24 марта 2020 // https://habr.com/ru/post/493482/
1123. Pickering A. (2010). The cybernetic brain. Sketches of another future. The University of Chicago Press // http://www.arise.mae.usp.br/wp-content/uploads/2018/03/Andrew-Pickering-Cybernetic-Brain_Cap.3.pdf
1124. Gabbay D., Woods J., Thagard P. (2006). Philosophy of Psychology and Cognitive Science. Elsevier Science // https://books.google.ru/books?id=Lp93PtrvMoMC
1125. Farley B., Clark W. (1954). Simulation of self-organizing systems by digital computer / Transactions of the IRE Professional Group on Information Theory, Vol. 4 (4), pp. 76–84 // https://doi.org/10.1109/tit.1954.1057468
1126. Clark W., Farley B. (1954). Generalization of pattern recognition in a self-organizing system / Proceedings of the March 1–3, 1955, western joint computer conference, pp. 86–91 // https://doi.org/10.1145/1455292.1455309
1127. Rochester N., Holland J., Haibt L., Duda W. (1956). Tests on a cell assembly theory of the action of the brain, using a large digital computer. IEEE Transactions on Information Theory, 2 (3), 80–93 // https://doi.org/10.1109/tit.1956.1056810
1128. Gabbay D., Woods J., Thagard P. (2006). Philosophy of Psychology and Cognitive Science. Elsevier Science // https://books.google.ru/books?id=Lp93PtrvMoMC
1129. Davis B. (2012). New Rochelle. Arcadia Publishing // https://books.google.ru/books?id=v5078L0q_wQC
1130. Kennedy K. (2016). Lasting Impact: One Team, One Season. What Happens When Our Sons Play Football. Time Incorporated Books // https://books.google.ru/books?id=qMi_DAAAQBAJ
1131. YIVO Institute of Jewish Research (2013). Frank Rosenblatt / Guide to the YIVO archives // http://www.yivoarchives.org/index.php?p=collections/controlcard&id=33295
1132. Goldsmith S. A. (1927). Dr. Frank F. Rosenblatt / The Jewish Social Service Quarterly. Stanford. The Berman Jewish Policy Archive // https://www.jewishdatabank.org/search-results/publication/12586
1133. Coblentz S., Elliot J., Burgess S. (1993). Adventures of a Freelancer: The Literary Exploits and Autobiography of Stanton A. Coblentz. Borgo Press // https://books.google.ru/books?id=Bd9R-hcy7iEC
1134. Бейзер М. (2014). Трудности «дистанционного управления» в истории «Джойнта» на примере его работы в России — СССР / Труды по еврейской истории и культуре. Материалы XXI ежегодной конференции по иудаике. Вып. 50 // https://sefer.ru/upload/Conf-21.text.1–575(25.12.14).pdf
1135. Scates S. (2006). Maurice Rosenblatt and the Fall of Joseph McCarthy. University of Washington Press // https://books.google.ru/books?id=8y53AAAAMAAJ
1136. Schudel M. (2005). Lobbyist Maurice Rosenblatt Dies / The Washington Post, August 15, 2005 // https://www.washingtonpost.com/archive/local/2005/08/15/lobbyist-maurice-rosenblatt-dies/572aad97–92b3–42fa-9e32-c0636e12be99/
1137. Dorrien G. (2018). Breaking White Supremacy: Martin Luther King Jr. and the Black Social Gospel. Yale University Press // https://books.google.ru/books?id=rjlFDwAAQBAJ
1138. Sejnowski T. (2018). The Deep Learning Revolution. New York, NY, USA: MIT Press // https://books.google.ru/books?id=9xZxDwAAQBAJ
1139. Emlen S. T., Howland H. C., O'Brien R. D. (1971). Frank Rosenblatt, July 11, 1928 — July 11, 1971: Cornell University Faculty Memorial Statement // https://ecommons.cornell.edu/bitstream/handle/1813/18965/Rosenblatt_Frank_1971.pdf
1140. Rosenblatt F. (1957). The Perceptron: A Perceiving and Recognizing Automaton. Project Para Report No. 85–460–1, Cornell Aeronautical Laboratory // https://blogs.umass.edu/brain-wars/files/2016/03/rosenblatt-1957.pdf
1141. Rosenblatt F. (1957). The perceptron: A Probabilistic model for Visual Perception / Proceedings of the 15th International Congress of Psychology, North Holland, pp. 290–297.
1142. Rosenblatt F. (1957). The Perceptron: A Perceiving and Recognizing Automaton. Project Para Report No. 85–460–1, Cornell Aeronautical Laboratory // https://blogs.umass.edu/brain-wars/files/2016/03/rosenblatt-1957.pdf

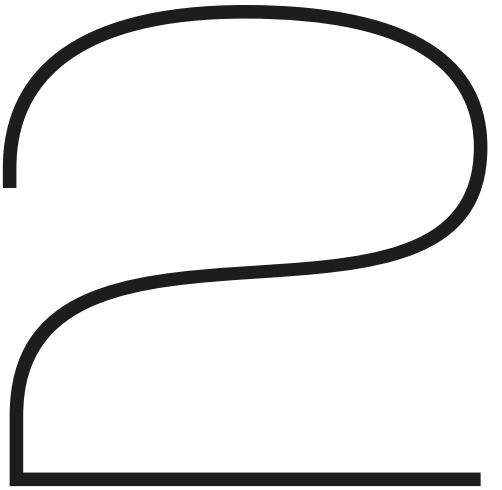
1143. Rosenblatt F. (1961). Principles of Neurodynamics. Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms. Cornell aeronautical lab inc., Buffalo, New York. Defense Technical Information Center // https://books.google.ru/books?id=Tk2tDAEACAAJ
1144. LeCun Y., Cortes C., Burges C. J. C. (1998). The MNIST database of handwritten digits // http://yann.lecun.com/exdb/mnist/
1145. Kussul E., Baidyk T., Kasatkina L., Lukovich V. (2001). Rosenblatt perceptrons for handwritten digit recognition / IJCNN'01. International Joint Conference on Neural Networks. Proceedings (Cat. No. 01CH37222) // https://doi.org/10.1109/ijcnn.2001.939589
1146. Backus J. (1978). Can Programming Be Liberated from the Von Neumann Style? A Functional Style and Its Algebra of Programs / Communications of the ACM, 21 (8), pp. 613–641 // http://doi.acm.org/10.1145/359576.359579
1147. Anderson J., Rosenfeld E. (2000). Talking Nets: An Oral History of Neural Networks. New York, NY, USA: MIT Press // https://books.google.ru/books?id= –l-yim2lNRUC
1148. Douglas S. C. (1995). Generalized gradient adaptive step sizes for stochastic gradient adaptive filters / 1995 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 2, Iss. 8, pp. 1396–1399 // https://doi.org/10.1109/ICASSP.1995.480502
1149. Anderson J., Rosenfeld E. (2000). Talking Nets: An Oral History of Neural Networks. New York, NY, USA: MIT Press // https://books.google.ru/books?id= –l-yim2lNRUC
1150. Hilberg v. W. (1995). Karl Steinbuch, ein zu Unrecht vergessener Pionier der künstlichen neuronalen Systeme / Frequenz, Vol. 49, pp. 1–2 // https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/freq.1995.49.1–2/freq.1995.49.1–2.28/freq.1995.49.1–2.28.pdf
1151. Karl Steinbuch: von der Kybernetik zur Politik (2017) / Heinz Nixdorf MuseumsForum Blog, 15.06.2017 // https://blog.hnf.de/karl-steinbuch-von-der-kybernetik-zur-politik/
1152. Bishop C. M. (2006). Pattern Recognition and Machine Learning. Information science and statistics. Springer New York // https://books.google.ru/books?id=kOXDtAEACAAJ
1153. United States. Office of Naval Research (1960). Research device recognizes objects or patterns / Naval Research Reviews, Volume 13, 4-Feb-1960 // https://books.google.ru/books?id=ve9cbfGDaywC
1154. Nilsson N. J. (2009). The Quest for Artificial Intelligence. Cambridge University Press // https://books.google.ru/books?id=nUJdAAAAQBAJ
1155. Huber W. A. (1968). Graphical data processing / Pattern Identification by Man and Machine. Proceedings of a Planning Conference Held at Texas Christian University, Fort Worth, Texas, 12–13 December, 1968 // https://books.google.ru/books?id=vaQlAAAAMAAJ
1156. Duda R. O., Nilsson N. J. (1965). Calculus of networks of adaptive elements. Proposal for Research SRI No. ESU 65–12R. Proposal Request 1–6–4400 // https://www.sri.com/wp-content/uploads/2021/12/1284.pdf
1157. Nilsson N. J. (2009). The Quest for Artificial Intelligence. Cambridge University Press // https://books.google.ru/books?id=nUJdAAAAQBAJ
1158. Fan S. (2019). Will AI Replace Us: A Primer for the 21st Century. Volume 0 of The Big Idea Series. Thames & Hudson // https://books.google.ru/books?id=5iapDwAAQBAJ
1159. Keay A., Silicon Valley Robotics (2017). Shakey is first robot to receive IEEE Milestone award / Robohub, February 28, 2017 // https://robohub.org/shakey-is-first-robot-to-receive-ieee-milestone-award/
1160. Mao L. (2017). Comprehensive Proof of Perceptron Convergence Theorem // https://leimao.github.io/blog/Perceptron-Convergence-Theorem/
1161. Витушкин А. Г. (2004). 13-я проблема Гильберта и смежные вопросы / Успехи математических наук. Т. 59. Вып. 1 (355). С. 11–24 // https://doi.org/10.4213/rm698
1162. Tavora M. (2018). Connections between Neural Networks and Pure Mathematics / freeCodeCamp, 12 December 2018 // https://www.freecodecamp.org/news/connections-between-deep-learning-physics-and-pure-mathematics-part-i-947abeb3a5dd/
1163. Hu J. (2015). Between Us: A Queer Theorist's Devoted Husband and Enduring Legacy / The New Yorker, December 9, 2015 // https://www.newyorker.com/books/page-turner/between-us-a-queer-theorists-devoted-husband-and-enduring-legacy
1164. Sedgwick H. A. (2017). Life of Eve Kosofsky Sedgwick / A resource for the exploration of the life and work of Eve Kosofsky Sedgwick // https://eveksedgwickfoundation.org/biography/biography.html
1165. Sedgwick H. A. (2016). The Cornell Student Homophile League // http://www.jearldmoldenhauer.com/wp-content/uploads/Cornell-Final5X.pdf

1166. Røigaard-Petersen, H. H., Nissen, T., Fjerdingstad, E. J. (1968). Effect of ribonucleic acid (RNA) extracted from the brain of trained animals on learning in rats / Scandinavian Journal of Psychology, Vol. 9, Iss. 1, pp. 1–16 // https://doi.org/10.1111/j.1467–9450.1968.tb00512.x
1167. Ungar G., Oceguera-Navarro C. (1965). Transfer of Habituation by Material extracted from Brain / Nature, vol. 207, pp. 301–302 // https://doi.org/10.1038/207301a0
1168. Setlow B. (1997). Georges Ungar and memory transfer / Journal of the history of the neurosciences, 6, pp. 181–192 // https://doi.org/10.1080/09647049709525701
1169. Babich F. R., Jacobson A. L., Bubash S., Jacobson A. (1965). Transfer of a Response to Naive Rats by Injection of Ribonucleic Acid Extracted from Trained Rats / Science, 06-Aug-1965, pp. 656–657 // https://doi.org/10.1126/science.149.3684.656
1170. Rosenblatt F., Farrow J. T., Herblin W. F. (1966). Transfer of Conditioned Responses from Trained Rats to Untrained Rats by Means of a Brain Extract / Nature, Vol. 209, Iss. 5018, pp. 46–48 // https://doi.org/10.1038/209046a0
1171. Fields R. D. (2011). Imaging Learning: The Search for a Memory Trace / The Neuroscientist, Vol. 17, Iss. 2, pp. 185–196 // https://doi.org/10.1177/1073858410383696
1172. Bédécarrats A., Chen S., Pearce K., Cai D., Glanzman D. L. (2018). RNA from Trained Aplysia Can Induce an Epigenetic Engram for Long-Term Sensitization in Untrained Aplysia / eNeuro, 14 May 2018, Vol. 5, Iss. 3 // https://doi.org/10.1523/ENEURO.0038–18.2018
1173. Lehnert W. G. (2013). Cognition, Computers, and Car Bombs: How Yale Prepared Me for the 90's / Schank R. C., Langer E. (2013). Beliefs, Reasoning, and Decision Making: Psycho-Logic in Honor of Bob Abelson. Psychology Press, Jun 17, 2013 // https://books.google.ru/books?id=EA01vM2uQd4C
1174. Crevier D. (1993). AI: the tumultuous history of the search for artificial intelligence // https://archive.org/details/aitumultuoushistoocrev/page/168
1175. Brügger N., Milligan I. (2018). The SAGE Handbook of Web History. SAGE Publications // https://books.google.ru/books?id=PENeDwAAQBAJ
1176. Pike D. (1985). Lukács and Brecht. Studien und Texte zur Sozialgeschichte der Literatur. University of North Carolina Press // https://books.google.ru/books?id=nGSk4a7kTBgC
1177. Sternberg R. J., Kaufman S. B. (2011). The Cambridge Handbook of Intelligence. Cambridge Handbooks in Psychology. Cambridge University Press // https://books.google.ru/books?id=FtYeTcNwzQ4C
1178. Holyoak K. J., Thagard P. (1996). Mental Leaps: Analogy in Creative Thought. MIT Press // https://books.google.ru/books/about/Mental_Leaps.html?id=8ZRHYv59154C
1179. Schank R. C., Cleary C. (1995). Engines for education. Lawrence Erlbaum Associates // https://books.google.ru/books/about/Engines_for_education.html?id=fWruAAAAMAAJ
1180. Kolodner J. L. (2002). The "Neat" and the "Scruffy" in Promoting Learning From Analogy: We Need to Pay Attention to Both / The Journal of the Learning Sciences, Vol. 11, No. 1, pp. 139–152 // https://www.jstor.org/stable/1466725
1181. Marx K. (1845). Thesen über Feuerbach. Geschrieben im Frühjahr // http://www.mlwerke.de/me/me03/me03_005.htm
1182. McCorduck P. (2004). Machines who think: a personal inquiry into the history and prospects of artificial intelligence. A. K. Peters // https://books.google.ru/books?id=aH9QAAAAMAAJ
1183. Pentland A. P., Fischler M. A. (1983). A More Rational View of Logic or, Up Against The Wall, Logic Imperialists! / AI Magazine, Vol. 4, Num. 4 // https://www.aaai.org/ojs/index.php/aimagazine/article/view/412/348
1184. Papert S. (1994). The Children's Machine — Rethinking School in the Age of the Computer. New York: Basic Books // https://books.google.ru/books?id=SqYGtAEACAAJ
1185. Broussard M. (2019). Artificial Unintelligence: How Computers Misunderstand the World. MIT Press // https://books.google.ru/books?id=67NMvAEACAAJ
1186. Boyle M. (1997). The History of Mr. Papert. 20–31. Logo in Australia: 21 Years On., Melbourne Vic Australia // http://www.stager.org/omaet2004/papertbio.html
1187. Papert S. (1998). Transcript of Child Power: Keys to the New Learning of the Digital Century at the 11th Colin Cherry Memorial Lecture on Communication, Imperial College, London // http://pirun.ku.ac.th/~btun/papert/childpower.pdf
1188. Boyle M. (1997). The History of Mr. Papert. 20–31. Logo in Australia: 21 Years On., Melbourne Vic Australia // http://www.stager.org/omaet2004/papertbio.html
1189. Broussard M. (2019). Artificial Unintelligence: How Computers Misunderstand the World. MIT Press // https://books.google.ru/books?id=67NMvAEACAAJ

1190. Silberman S. (2005). Life After Darth / Wired, 05.01.2005 // https://www.wired.com/2005/05/lucas-2/
1191. Martin S. (2012). Roman Kroitor, 85, revolutionized the film world / The globe and mail, October 5, 2012 // https://www.theglobeandmail.com/news/toronto/roman-kroitor-85-revolutionized-the-film-world/article4593837/?page=all
1192. Dreyfus H. L. (1965). Alchemy and artificial intelligence / P-3244, December 1965 // https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/papers/2006/P3244.pdf
1193. Horgan J. (2000). The Undiscovered Mind: How the Human Brain Defies Replication, Medication, and Explanation. A Touchstone book. Simon and Schuster // https://books.google.ru/books?id=zMjx-O7HHftUC
1194. MacKenzie D. (1995). The Automation of Proof: A Historical and Sociological Exploration / IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 17, No. 3, 1995 // http://www.cs.cornell.edu/courses/cs4860/2012fa/MacKenzie-TheAutomationOfProof.pdf
1195. Dreyfus H. L. (1965). Alchemy and artificial intelligence / P-3244, December 1965 // https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/papers/2006/P3244.pdf
1196. Dreyfus H. L. (1979). What Computers Can't Do: The Limits of Artificial Intelligence. Colophon books. Harper & Row // https://books.google.ru/books?id=9SGdAQAACAAJ
1197. Славин С. (1994). Лететь или катиться? / Юный техник. № 2 // http://www.nehudlit.ru/journals/detail1184287.html
1198. Puck, Vol. 52, No. 1347, p. 2, Published at the Puck Building, New York, Copyright Keppler and Schwarzmann, New York // https://hdl.handle.net/2027/umn.31951002801288o?urlappend=%3Bseq=358
1199. People Who Say It Cannot Be Done Should Not Interrupt Those Who Are Doing It: George Bernard Shaw? Puck? Saxby's Magazine? Elbert Hubbard? Confucius? Anonymous? / Quote Investigator, Posted on January 26, 2015 // https://quoteinvestigator.com/2015/01/26/doing/
1200. Newborn M., Standish T. A. (2014). Computer Chess. ACM monograph series. Elsevier Science // https://books.google.ru/books?id=KKGjBQAAQBAJ
1201. McCorduck P. (2004). Machines who think: a personal inquiry into the history and prospects of artificial intelligence. A. K. Peters // https://books.google.ru/books?id=aH9QAAAAMAAJ
1202. MacKenzie D. (1995). The Automation of Proof: A Historical and Sociological Exploration / IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 17, No. 3, 1995 // http://www.cs.cornell.edu/courses/cs4860/2012fa/MacKenzie-TheAutomationOfProof.pdf
1203. McCorduck P. (2004). Machines who think: a personal inquiry into the history and prospects of artificial intelligence. A. K. Peters // https://books.google.ru/books?id=aH9QAAAAMAAJ
1204. Crevier D. (1993). AI: the tumultuous history of the search for artificial intelligence // https://archive.org/details/aitumultuoushistoocrev
1205. Boyle M. (1997). The History of Mr. Papert. 20–31. Logo in Australia: 21 Years On., Melbourne Vic Australia // http://www.stager.org/omaet2004/papertbio.html
1206. Papert S. (1992). One AI or Many? / Beakley B., Ludlow P. (1992). The philosophy of mind: Classical problems/contemporary issues. Cambridge, MA, US: The MIT Press // https://books.google.ru/books/about/The_Philosophy_of_Mind.html?id=pB-V526wnJigC
1207. Александр (rgen3). (2011). Что такое искусственные нейронные сети? / Хабр, 21 декабря 2011 // https://habr.com/ru/post/134998/
1208. Сергей (tac). (2012). Перцептрон Розенблатта — что забыто и придумано историей? / Хабр, 20 марта // https://habr.com/ru/post/140301/
1209. Minsky M., Papert S. A. (1969). Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry. MIT Press // https://books.google.ru/books?id=KhI-uwEACAAJ
1210. Block H. D. (1970). A review of 'Perceptrons' / Information and Control, Vol. 17, pp. 510–522 // https://doi.org/10.1016/S0019–9958(70)90409–2
1211. Olazaran M. (1993). A Sociological History of the Neural Network Controversy / Advances in Computers, Vol. 37 // https://doi.org/10.1016/S0065–2458(08)60408–8
1212. Rosenblatt F. (1961). Principles of Neurodynamics. Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms. Cornell aeronautical lab inc., Buffalo, New York. Defense Technical Information Center // https://books.google.ru/books?id=Tk2tDAEACAAJ
1213. Olazaran M. (1993). A Sociological History of the Neural Network Controversy / Advances in Computers, Vol. 37 // https://doi.org/10.1016/S0065–2458(08)60408–8
1214. Block H. D. (1970). A review of 'Perceptrons' / Information and Control, Vol. 17, pp. 510–522 // https://doi.org/10.1016/S0019–9958(70)90409–2
1215. Minsky M., Papert S. A. (1969). Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry. MIT Press // https://books.google.ru/books?id=KhI-uwEACAAJ
1216. Anderson J., Rosenfeld E. (2000). Talking Nets: An Oral History of Neural Networks. New York,

NY, USA: MIT Press // https://books.google.ru/books?id= –l-yim2lNRUC

1217. Olazaran M. (1993). A Sociological History of the Neural Network Controversy / Advances in Computers, Vol. 37 // https://doi.org/10.1016/S0065–2458(08)60408–8
1218. Olazaran M. (1993). A Sociological History of the Neural Network Controversy / Advances in Computers, Vol. 37 // https://doi.org/10.1016/S0065–2458(08)60408–8
1219. Dr. Frank Rosenblatt Dies at 43; Taught Neurobiology at Cornell / The New York Times, July 13, 1971, p. 36 // https://www.nytimes.com/1971/07/13/archives/dr-frank-rosenblatt-dies-at-43-taught-neurobiology-at-cornell.html
1220. Olazaran M. (1993). A Sociological History of the Neural Network Controversy / Advances in Computers, Vol. 37 // https://doi.org/10.1016/S0065–2458(08)60408–8
1221. Dreyfus H. L., Dreyfus S. E. (1995). Making a mind vs. Modeling the brain: AI back at a branchpoint / Informatica, 1995, Num. 4, Vol. 19 // http://www.ccs.fau.edu/~bressler/EDU/CompNeuro/Resources/Mind_Modelling_Brain.pdf
1222. Tofts D., Jonson A., Cavallaro A. (2004). Prefiguring Cyberculture: An Intellectual History. MIT Press // https://books.google.ru/books?id=LNyvD79vNVEC
1223. Sedgwick H. A. (2016). The Cornell Student Homophile League // http://www.jearldmoldenhauer.com/wp-content/uploads/Cornell-Final5X.pdf
1224. Edwards J., Campbell M. B., Boulton M., Brown A., Edwards J., Kent K. R., Sedgwick E. K., Pearl M., Westwood B. (2017). Bathroom Songs: Eve Kosofsky Sedgwick as a Poet. Earth, Milky Way: punctum books // https://doi.rog/10.21983/P3.0189.1.00



ТОМ

5 Предвестники весны искусственного интеллекта

5.1 Три ключевых фактора успеха
5.2 Модели и алгоритмы
5.3 Машины
5.4 Данные

6 Час настал. Да грянет бал!

6.1 ИИ сейчас — большой интерес, обширные вложения и хорошие прогнозы
6.2 Машина распознаёт образы
6.3 Машина учится понимать: обработка естественного языка
6.4 Машина учится говорить
6.5 Эмоциональные вычисления и социальный ИИ
6.6 Машина учится творить: генеративные модели

7 Легенда о големе:
ИИ, захватывающий мир

7.2 Сверхразум: реальные и мнимые опасности
7.3 Съедят ли людей электроовцы?
7.4 Цифровой тайный суд и другие проблемы алгоритмического общества
7.5 Законодательное регулирование ИИ
7.6 Будем разумны!

8 Контуры будущего:
задачи сегодняшнего и завтрашнего дня

8.1 Перспективные направления исследований
8.2 Облачные технологии и распределённое обучение
8.3 Иллюзии нейросетей
8.4 Интерпретация работы моделей ИИ
8.5 Морально-этические вопросы применительно к ИИ
8.6 Далеко ли до общего искусственного интеллекта (AGI)?

Заключение
Благодарности

Сергей Марков

Охота на электроовец

Большая книга искусственного интеллекта

Том 1

Главный редактор Андрей Федичкин
Научный редактор (глубокое обучение) кандидат физико-математических наук, Михаил Бурцев
Научный редактор (биология) доктор биологических наук, Александр Каплан
Литературный редактор Денис Яцутко
Корректоры Ольга Петрова, Галина Лаврик

Иллюстрации: Олег Добровольский
Инфографика: Софья Кравецкая, Алексей Кравецкий
Дизайн переплёта, макет: Артоника — Дмитрий Черногаев, арт-директор; Ксения Гневушева, руководитель проекта; Станислав Новиков, вёрстка и пре-пресс

Общероссийский классификатор продукции
ОК-034-2014 (КПЕС 2008);
58.11.1 — книги, брошюры печатные
Подписано в печать 19.08.2024. Формат 84×108 1/16

Бумага офсетная. Гарнитура Noto Serif
Печать офсетная. Усл. печ. л. 35,5
Тираж 1500 экз. Заказ № 2193-24
Изготовитель ООО «Алатырь»
Адрес: 123022, г. Москва,
ул. 1905 года, д. 7, стр. 1, пом. 1А, офис 30

Охраняется законом РФ об авторском праве.

Захватывающая дух история развития искусственного интеллекта от человека, работающего на переднем крае современной науки и разрабатывающего технологии ИИ завтрашнего дня, ещё вчера казавшиеся абсолютной фантастикой.

Дмитрий Ветров, *профессор Constructor University, Bremen*

Сергей Марков — специалист в области искусственного интеллекта и машинного обучения. С конца 1990-х занимается разработкой и руководством проектами, связанными с применением систем ИИ в различных областях человеческой деятельности. Создатель шахматной программы SmarThink (одной из сильнейших отечественных шахматных программ в 2000-е годы). Основатель научно-популярного портала «XX2 век» (22century.ru), автор ряда научных статей и множества научно-популярных лекций, посвящённых теме ИИ. В настоящее время управляющий директор, начальник Управления экспериментальных систем машинного обучения Дивизиона общих сервисов «Салют» ПАО «Сбербанк», где при его непосредственном участии были созданы такие нейросетевые модели, как ruGPT-3, ruGPT-3.5, GigaChat, ruDALL-E Malevich, Kandinsky, mGPT и другие.

ISBN 978-5-6052656-0-3