

УДК 004.85
ББК 32.973
С28

THE DEEP LEARNING REVOLUTION
TERRENCE J. SEJNOWSKI

©2018 Massachusetts Institute of Technology. The rights to the Russian-language edition obtained through Alexander Korzhenevski Agency (Moscow)

Сейновски, Терренс.

C28 Антология машинного обучения : важнейшие исследования в области ИИ за последние 60 лет / Терренс Сейновски ; [перевод с английского М. А. Райтмана, Е. В. Сазановой]. — Москва : Эксмо, 2022. — 304 с. — (Библиотека MIT).

ISBN 978-5-04-101347-9

История машинного обучения, от теоретических исследований 50-х годов до наших дней, в изложении ведущего мирового специалиста по изучению нейросетей и искусственного интеллекта Терренса Сейновски. Автор рассказывает обо всех ключевых исследованиях и событиях, повлиявших на развитие этой технологии, начиная с первых конгрессов, посвященных искусственному разуму, и заканчивая глубоким обучением и возможностями, которые оно предоставляет разработчикам ИИ.

УДК 004.85
ББК 32.973

ISBN 978-5-04-101347-9

© Райтман М.А., перевод на русский язык, 2019
© Сазанова Е.В., перевод на русский язык, 2021
© Оформление. ООО «Издательство «Эксмо», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	9
-------------------	---

ЧАСТЬ I ПЕРЕОСМЫСЛЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТА: ХРОНОЛОГИЯ

Глава 1. Развитие машинного обучения	13
Учим водить	14
Учим переводить.....	17
Учим слушать.....	19
Учим ставить диагноз.....	20
Учим зарабатывать деньги	23
Учим играть в покер.....	25
Учим играть в го.....	26
Учим становиться умнее.....	30
Изменение рынка труда.....	31
Искусственный интеллект — реальная угроза?	33
Назад в будущее	35
Глава 2. Перерождение искусственного интеллекта.....	36
Детская игра?.....	36
Почему компьютерное зрение — трудная задача?.....	37
Экспертная система.....	40
В логове льва	42
Глава 3. Спад нейронных сетей.....	47
Первооткрыватели.....	49
Обучение на примерах.....	50
SEXNET.....	54
Закат перцептронов.....	56
Глава 4. Обработка данных как в человеческом мозге.....	59
Как работает мозг	59
Первые успехи.....	62
Прапраправнук Джорджа Буля	65
Проект «Шалтай-Болтай»	66
Чему я научился в Вудс-Хоуле	68
Недостающее звено	71

Глава 5. Понимание зрительной системы.....	73
Схема работы зрения	75
Зрительная система в коре мозга	77
Пластичность синапса	79
Восстановление формы объекта по теням	81
Иерархическая организация визуальных карт коры головного мозга.....	85
Появление когнитивной нейробиологии.....	88

ЧАСТЬ II

МНОЖЕСТВО СПОСОБОВ ОБУЧЕНИЯ: ХРОНОЛОГИЯ

Глава 6. Проблема коктейльной вечеринки.....	93
Независимый компонентный анализ	93
Независимый компонент в мозге.....	98
За рамками ICA	101
Глава 7. Нейронная сеть Хопфилда и машина Больцмана.....	103
Джон Хопфилд.....	104
Сеть с ассоциативной памятью	105
Поиск глобального энергетического минимума	108
Машины Больцмана	109
Теория синаптической пластичности Хебба.....	114
Изучение зеркальной симметрии	116
Распознавание почтовых индексов, написанных вручную	117
Неконтролируемое обучение и развитие коры головного мозга.....	119
Глава 8. Метод обратного распространения ошибки.....	122
Оптимизация	124
NETtalk.....	125
Возрождение нейронных сетей	130
Понимание глубокого обучения	132
Ограничения нейронных сетей.....	136
Продвижение	138
Глава 9. Сверточные сети	140
Устойчивый прогресс в машинном обучении	140
Сверточные нейронные сети	144
Столкновение глубокого обучения и визуальной иерархии.....	146
Рабочая память и долговременное хранение данных.....	147
Порождающие состязательные сети	150
Все дело в масштабировании	154

Глава 10. Обучение с подкреплением	157
Учим играть в нарды	157
Обучение мозга методом вознаграждения	163
Мотивация и базальные ганглии	167
Учим парить	169
Учим петь	171
Другие формы обучения	173
Чего не хватает?	174
Глава 11. Нейронные системы обработки информации	175
Глубокое обучение за игровым столом	179
Подготовка к будущему	181

ЧАСТЬ III ТЕХНИЧЕСКИЕ И НАУЧНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ: ХРОНОЛОГИЯ

Глава 12. Будущее машинного обучения	185
Жизнь в XXI веке	186
Будущее идентичности	187
Рассвет социальных роботов	188
Руби	190
Выражение лица — окно в вашу душу	194
Наука об обучении	197
Научитесь учиться	202
Тренировка мозга	207
Искусственный интеллект и бизнес	210
Глава 13. Эпоха алгоритмов	214
Сложные системы	215
Клеточный автомат	217
Мозг — это компьютер?	219
Пространство алгоритмов	220
Глава 14. Привет, мистер Чип	224
Горячие чипы	225
Холодные чипы	227
Нейроморфная инженерия	230
Конец закона Мура?	237
Глава 15. Внутренняя информация	239
Информационная теория	239
Теория чисел	241
Прогностическое кодирование	244
Глобальный мозг	246

Операционные системы	248
Информация на всех уровнях.....	250
Играть в долгую игру	251
Глава 16. Сознание	253
Нейронные корреляты сознания	254
Бабушкины клетки	255
Когда воспринимается время визуального события?.....	259
Где в мозгу воспринимается зрительный образ?.....	260
Учим смотреть	261
Переходы	263
Глава 17. Природа умнее нас.....	265
Второй закон Орджеда.....	266
Дело против А. Н. Хомского.....	268
Бедность воображения	270
Дело против «черных ящиков»	273
Дело против М. Л. Минского	275
Шаги	280
Глава 18. Глубокий интеллект.....	282
Франциск Крик в раю	282
Эволюция интеллекта	285
Откуда мы вообще взялись?.....	286
Логика жизни	287
Дополнительная литература	290
Введение в нейробиологию	290
Биологический интеллект.....	291
Машинное обучение	291
Благодарности.....	293
Глоссарий.....	298

ПРЕДИСЛОВИЕ

Используя распознавание голоса в смартфоне на Android или в Google Переводчике в Интернете, вы сталкиваетесь с нейросетью, натренированной глубоким обучением. За последние несколько лет глубокое обучение обеспечило компании Google прибыль, достаточную для того, чтобы покрыть расходы на все футуристические проекты Google X, включая беспилотные автомобили, очки Google Glass и научно-исследовательский проект Google Brain*. Она одной из первых начала применять глубокое обучение. В 2013 году Google наняла Джеффри Хинтона, отца-основателя глубокого обучения, и сейчас другие компании пытаются угнаться за ней.

Современные достижения в области искусственного интеллекта (ИИ) получены благодаря реверсивной инженерии** человеческого мозга. Алгоритмы обучения многоуровневых нейронных сетей основаны на том, как нейроны взаимодействуют друг с другом и изменяются в процессе получения опыта. Внутри сети вся многогранность мира превращается в калейдоскоп моделей деятельности, которые и являются основными составляющими ИИ. Модели нейросетей, с которыми я работал в 1980-х годах, едва сравнимы с современными, состоящими из миллионов искусственных нейронов и десятков слоев. Человеческое упорство, огромный объем данных и мощные компьютеры позволили глубокому обучению совершить прорыв в решении самых сложных проблем искусственного интеллекта.

Сложно предугадать, какое влияние новые технологии окажут в будущем. Кто мог предсказать в 90-х годах прошлого века, когда Интернет стал коммерческим, как он повлияет на музыкальный бизнес? А на такси, политические кампании, да и практически все стороны нашей жизни? Когда появились первые компьютеры, тоже тяжело было вообразить, как они изменят нашу жизнь. В 1943 году Томаса Джона Уотсона, президента IBM, спросили, как повлияют компьютеры на наш мир, и он ответил: «Я думаю, мировой рынок компьютеров вряд ли превысит

* Астро Теллер, «капитан муншотов» Google (moonshot — полет на Луну, в переносном смысле — смелый и передовой проект), 6 февраля 2015 года сказал, что глубокое обучение помогло снизить потребление энергии на 15% и тем самым ежегодно экономить компании Google X сотни миллионов долларов. — *Прим. авт.*

** Реверсивная инженерия, или обратное проектирование, — исследование объекта с целью понять принцип его работы. — *Прим. ред.*

пять штук». Что действительно сложно представить, так это то, как будет использоваться новое изобретение — и сами изобретатели не скажут больше, чем любой другой человек. Глубокое обучение и ИИ находятся на столь же ранней стадии. Есть множество вариантов развития событий — от утопического и до апокалиптического, — но даже авторы научной фантастики с очень развитой фантазией вряд ли предскажут последствия.

Первые наброски этой книги я сделал через несколько недель после пешего тура по северо-западному побережью Тихого океана и изучения важных изменений в мире ИИ, появившихся десятилетия назад. История рассказывала о небольшой группе ученых, бросивших вызов государственному институту, занимавшемуся вопросами ИИ и не имевшему конкурентов. Они сильно недооценивали сложность задачи и полагались на интуицию, что оказалось ошибкой.

Жизнь на Земле таит в себе множество загадок, и происхождение разума — одна из самых сложных. В природе достаточно его форм, от «интеллекта» простейших бактерий до разума человека, и каждая из них адаптирована к своей нише. Искусственный интеллект так же будет представлен разнообразием форм, которые займут свои места в этом спектре. Так как ИИ основывается на создании глубоких нейронных сетей, по мере своего развития он может подтолкнуть к переосмыслению понятия биологического интеллекта.

Книга, которую вы держите в руках, — гид по прошлому, настоящему и будущему глубокого обучения. Она не охватывает все аспекты данного вопроса — скорее, это личный взгляд на основные достижения, а также на исследователей, их добившихся. Человеческая память, обращаясь к одним и тем же воспоминаниям, все больше их искажает. Этот процесс называется реконсолидацией. Истории, рассказанные в книге, охватывают период более сорока лет, и хотя некоторые из них свежи в моей памяти так, словно они были вчера, я осознаю, что определенные детали стерлись.

В первой части речь пойдет о предпосылках к рождению глубокого обучения и основных этапах его создания, необходимых для понимания его сути. Во второй части объяснены алгоритмы обучения нейронных сетей с различной структурой. Наконец, в третьей части исследуется влияние ИИ на нашу жизнь. Но, как говорил бейсболист «Нью Йорк Янкиз» Йоги Берра, известный своими «философскими» высказываниями: «Трудно делать прогнозы, особенно насчет будущего». Есть также девять блоков с технической информацией, необязательной для понимания текста. Хронология охватывает события более шестидесяти лет.

Часть I

**ПЕРЕОСМЫСЛЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТА:
ХРОНОЛОГИЯ**

1956 — **Дартмутский летний исследовательский семинар** положил начало разработке ИИ и мотивировал целое поколение ученых исследовать потенциальные возможности информационных технологий с целью добиться воспроизведения ИИ возможностей человека.

1962 — **Фрэнк Розенблатт** опубликовал книгу «Принципы нейродинамики. Перцептроны* и теория механизмов мозга»**. В ней были представлены обучающие алгоритмы для моделей однослойных нейронных сетей, ставшие предшественниками современных алгоритмов глубокого обучения.

1962 — **Дэвид Хьюбел и Торстен Визел** выпустили статью «Рецептивные поля, бинокулярное взаимодействие и функциональная архитектура зрительной коры кошек», где впервые были описаны характеристики отклика нейронов, записанные при помощи микроэлектрода. Архитектура глубокого обучения нейросетей подобна иерархии областей зрительной коры.

1969 — **Марвин Минский и Сеймур Пейперт** опубликовали книгу «Перцептроны***», которая показала вычислительные ограничения перцептронов и ознаменовала начало «зимы» в изучении нейросетей.

1979 — **Джеффри Хинтон и Джеймс Андерсон** провели в Ла-Хойя в Калифорнии семинар по параллельным моделям ассоциативной памяти, на которых основывались нейросети нового поколения.

1986 — **Первая конференция по машинному обучению и системам обработки нейронной информации**, проходившая в Денвере, собрала вместе исследователей из различных областей науки.

* Перцептрон — математическая или компьютерная модель восприятия информации мозгом. — *Прим. ред.*

** В переводе на русский книга вышла в 1965 году. — *Прим. ред.*

*** В переводе на русский книга вышла в 1971 году. — *Прим. ред.*

Глава 1

РАЗВИТИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Не так давно считалось, что компьютерная оптическая система не способна сравниться со зрением даже годовалого ребенка. Сейчас это утверждение уже неверно, и компьютеры могут распознавать объекты на изображении так же хорошо, как и человек, а машины на автопилоте едут аккуратнее, чем шестнадцатилетний подросток. Более того, компьютерам никто не говорил, как смотреть или водить, — они научились на собственном опыте, следуя тем же путем, что и природа на протяжении миллионов лет. Их успехи подпитывает огромный объем данных — нового топлива современного мира. Из потока необработанных данных обучающие алгоритмы извлекают информацию. Информация превращается в знание. Знание, в свою очередь, лежит в основе понимания, а понимание порождает мудрость. Это долгий путь, который требует времени. Добро пожаловать в дивный новый мир глубокого обучения!*

Глубокое обучение — ветвь машинного обучения, основанного на математике, информатике и нейробиологии. Глубокие нейросети учатся на данных, как дети, — исследуя окружающий их мир, переходят от полной неопытности к способности ориентироваться в незнакомой среде.

Глубокое обучение зародилось с появлением информационных технологий в 1950-х годах. Тогда существовали два подхода к созданию ИИ: первый доминировал на протяжении нескольких десятилетий и основывался на логике и компьютерных программах, второй предполагал обучение непосредственно на полученных данных, но занимал гораздо больше времени.

В XX веке, когда компьютеры были намного примитивнее, а хранение данных стоило дороже, чем сегодня, логика оставалась единственным способом решения задач. Опытные программисты писали различные программы для различных задач, и чем масштабнее была задача, тем сложнее была программа. Сейчас компьютеры обладают большой мощностью, способны обрабатывать огромный объем информации

* «О дивный новый мир, где обитают такие люди!» — «Бурия», Шекспир, пер. О. Сорока, 1989. — *Прим. авт.*

и благодаря особым алгоритмам решают задачи быстрее, точнее и эффективнее. Одни и те же алгоритмы могут использоваться для решения многих задач, и это куда проще, чем писать программу для каждой.

Учим водить

Машина по имени Стэнли (Stanley), сконструированная командой Себастьяна Труна из Стэнфордского университета (рис. 1.1), выиграла два миллиона долларов в гонке беспилотных автомобилей от Управления перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (Defense Advanced Research Projects Agency; DARPA). Стэнли ориентировался в калифорнийской пустыне благодаря машинному обучению. На семимильной трассе встречались узкие туннели и резкие повороты, а также перевал Бир-Ботл* — ветреная горная дорога с обрывом с одной стороны и горами с другой (рис. 1.2). Вместо того чтобы пойти традиционным путем и написать компьютерную программу, которая могла бы предвидеть любую неожиданность, Трун провел Стэнли по всей пустыне, чтобы машина училась ездить, опираясь на данные с оптических датчиков и датчиков расстояния.



Рис. 1.1. Себастьян Трун на фоне Стэнли, выигравшего в 2005 году гонку беспилотных автомобилей от DARPA. Этот прорыв положил начало технической революции в сфере транспорта

* Beer Bottle Pass — перевал в горной цепи Люси-Грей-Маунтинс в штате Невада. — Прим. ред.



Рис. 1.2. Beer Bottle Pass. Во время гонки беспилотных автомобилей, организованной DARPA в 2005 году, этот сложный участок местности находился ближе к концу трассы длиной 212 километров, пролежавшей в пустыне по бездорожью. Грузовик вдали только начинает подъем

Позже Себастьян Трун основал Google X — исследовательскую лабораторию по разработке высокотехнологичных проектов, где технологии беспилотных автомобилей получили дальнейшее развитие. С тех пор беспилотные автомобили Google проехали по району залива Сан-Франциско миллионы километров. В декабре 2016 года проект был выделен в отдельную компанию Waymo. Uber запустил беспилотные автомобили в Питсбурге. Apple также разрабатывает беспилотные автомобили, чтобы расширить спектр устройств под управлением их операционной системы в надежде повторить свой успех на рынке мобильных телефонов. Производители машин, чьи технологии практически не менялись на протяжении ста лет, следуют по их стопам. General Motors заплатил миллиард долларов за Cruise Automation, проект в Кремниевой долине, занимающийся разработкой транспорта, который не нуждается в водителе, а также инвестировал шестьсот миллионов долларов в его развитие и совершенствование*. Ставки на участие в секторе перевозок, где крутятся триллионы долларов, высоки.

Вскоре беспилотные автомобили станут серьезной проблемой для водителей грузовиков и легковых такси. В конечном итоге не будет

* Власич Б. General Motors хочет управлять беспилотными автомобилями будущего. New York Times, 4 июня 2017 года. www.nytimes.com/2017/06/04/business/general-motors-self-driving-cars-mary-barra.html

необходимости покупать автомобиль, если беспилотные машины смогут прибыть через минуту и безопасно доставить вас к месту назначения. Кроме того, вам не нужно будет парковаться! Среднестатистический автомобиль проводит четыре процента времени в дороге, а остальные 96 стоит без дела. Огромные участки в городах, которые сейчас занимают парковки, можно будет использовать для других целей, тогда как беспилотные автомобили станут парковаться за городом. Также это повлияет на многие другие сферы, например на страховые компании и магазины запчастей. Станет гораздо меньше смертей из-за вождения в нетрезвом виде и из-за того, что водители засыпают за рулем. Время, которое мы тратим, чтобы добраться до работы, можно будет использовать для других целей. Согласно переписи населения, проведенной в США в 2014 году, 139 миллионов человек тратят на дорогу на работу и с нее в среднем 26 минут в каждую сторону. Это 29,6 миллиарда часов в год, целых 3,4 миллиона лет человеческих жизней, которые можно было бы использовать гораздо лучше*. Кто захочет угнать машину без руля, которая, вдобавок ко всему, еще и сама вернется домой? Придет конец автомобильным кражам. Пока еще на этом пути стоит множество нормативных и правовых препятствий, однако когда беспилотные автомобили начнут использовать повсеместно, мы будем жить в дивном новом мире. Первыми — вероятно, уже лет через десять — беспилотными станут грузовики, такси — через пятнадцать, а личные автомобили завершат переход лет через 25–50.

Беспилотные автомобили — лишь самая заметная часть сдвига в экономике, вызванного информационными технологиями. Данные текут в Интернете, как вода по городскому трубопроводу. Они собираются в огромных информационных центрах, управляемых такими компаниями, как Google, Amazon, Microsoft и др. Для их работы требуется огромное количество электроэнергии, поэтому центры располагаются рядом с гидроэлектростанциями — при передаче потока информации вырабатывается столько тепла, что только реки могут его охладить. В 2013 году информационные центры в США потребили 10 миллионов мегаватт, что сравнимо с энергией, которую вырабатывают 34 большие электростанции**. Но гораздо большее значение для экономики имеет то, как используются эти данные. Необработанная информация превращается в знание

* Ингрэм К. Невероятный человеческий потенциал, потраченный на дорогу на работу. Washington Post, 24 февраля 2016 года. www.washingtonpost.com/news/wonk/wp/2016/02/25/how-much-of-your-life-youre-wasting-on-your-commute

** Американские центры обработки данных потребляют все больше энергии. Совет по защите природных ресурсов, 2015. www.nrdc.org/resources/americas-data-centers-consuming-and-wasting-growing-amounts-energy

о людях: что вы делаете, чего хотите и что вообще из себя представляете. Более того, эта информация передается от вас через устную речь.

Учим переводить

В настоящее время глубокое обучение применяется в компании Google для сотни приложений, от Street View и до Inbox Smart Reply, а также для голосового поиска. Несколько лет назад инженеры Google поняли, что необходимо доработать эти приложения до очень высокого уровня, и приступили к созданию специального чипа, предназначенного для глубокого обучения. Для удобства плата спроектирована так, что входит в стандартный слот для жесткого диска в стойке центра обработки данных. Тензорный процессор Google (Google Tensor Processing Unit; Google TPU) сегодня внедрен на множестве серверов по всему миру, значительно повышая производительность приложений с глубоким обучением.



Рис. 1.3. Приложение Google Translate мгновенно переводит с других языков дорожные указатели, стоит навести на них камеру. Это особенно актуально, если вам нужно сесть на поезд в Японии

Пример того, как быстро глубокое обучение может изменить мир, — его влияние на перевод с иностранных языков. Перевод с одного языка на другой — заветная мечта ИИ, поскольку основан на понимании предложений целиком. В 2016 году компания Google запустила новый Переводчик, основывающийся на глубоком обучении, что стало большим шагом на пути к живому переводу. Буквально в одночасье перевод превратился из беспорядочного смешения отдельных фраз в связные

предложения (рис. 1.3). Раньше программа искала комбинации слов, которые можно было бы перевести вместе, но глубокое обучение создает перевод, исходя из смысла всего предложения.

18 ноября 2016 года научный сотрудник Токийского университета Юн Рекимото заметил внезапное усовершенствование Google Переводчика. Чтобы протестировать новую систему, он перевел в приложении начало рассказа Эрнеста Хемингуэя «Снега Килиманджаро» на японский, а затем обратно на английский. Читателю нужно определить, какой отрывок принадлежит Хемингуэю, а какой — Google Переводчику*:

1. Килиманджаро — покрытый вечными снегами горный массив высотой в 19 710 футов, как говорят, высшая точка Африки. Племя масаи называет его западный пик «Нгайэ-Нгайя», что значит «Дом Бога». Почти у самой вершины западного пика лежит иссохший мерзлый труп леопарда. Что понадобилось леопарду на такой высоте, никто объяснить не может**.

2. Килиманджаро — это заснеженная гора высотой 19 710 футов, которая считается самой высокой горой в Африке. Его западная вершина называется Масаи «Нгадже Нгаи», Дом Бога. Рядом с западной вершиной находится высушенная и замороженная туша леопарда. Никто не объяснил, что искал леопард на такой высоте***.

Следующая цель глубокого обучения — научить автопереводчик работать с абзацами, чтобы он мог выявлять связи между несколькими предложениями. У слов глубокие культурные корни. Владимир Набоков, автор романа «Лолита», писавший и на русском, и на английском, пришел к выводу, что невозможно переводить поэзию. Его литературный перевод на английский язык «Евгения Онегина» Пушкина**** дополнен пояснениями о культуре той страны и того времени, в котором создавался оригинал; необходимость давать такие сноски подтверждает его точку зрения. Но, возможно, однажды Google Переводчик сможет переводить произведения Шекспира, опираясь на контекст его творчества в целом*****.

* Льюис-Краус Гидеон. New York Times Magazine, 14 декабря 2016 года. www.nytimes.com/2016/12/14/magazine/the-great-ai-awakening.html?_r=0 Hemingway is # 1

** Цит. по: Хемингуэй Э. Снега Килиманджаро / Перевод с английского Н.А. Волжиной. М., 1968.

*** Перевод оригинала с английского языка на русский, выполненный Google Переводчиком в 2021 году. — *Прим. ред.*

**** Eugene Onegin. A Novel in Verse by Alexandr Pushkin / Translated from the Russian, with a Commentary, by Vladimir Nabokov. In four volumes. — NY: Pantheon Books, 1964.

***** Ранние попытки приведены в статье «Завышенная эффективность рекуррентных нейронных сетей» по ссылке: karpathy.github.io/2015/05/21/rnn-effectiveness/ — *Прим. авт.*