

Отрывки из книги Сергея Маркова для канала "Антропогенез"
(темы: биология, мозг, эмоции)

Отрывок 1



Рис. 81. Долгопёрый прибрежный кальмар

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!

В итоге учёные создали модель Ходжкина — Хаксли, но для её рассмотрения надо вначале поговорить о механизмах, лежащих в основе нервной проводимости.

Отрывок 2

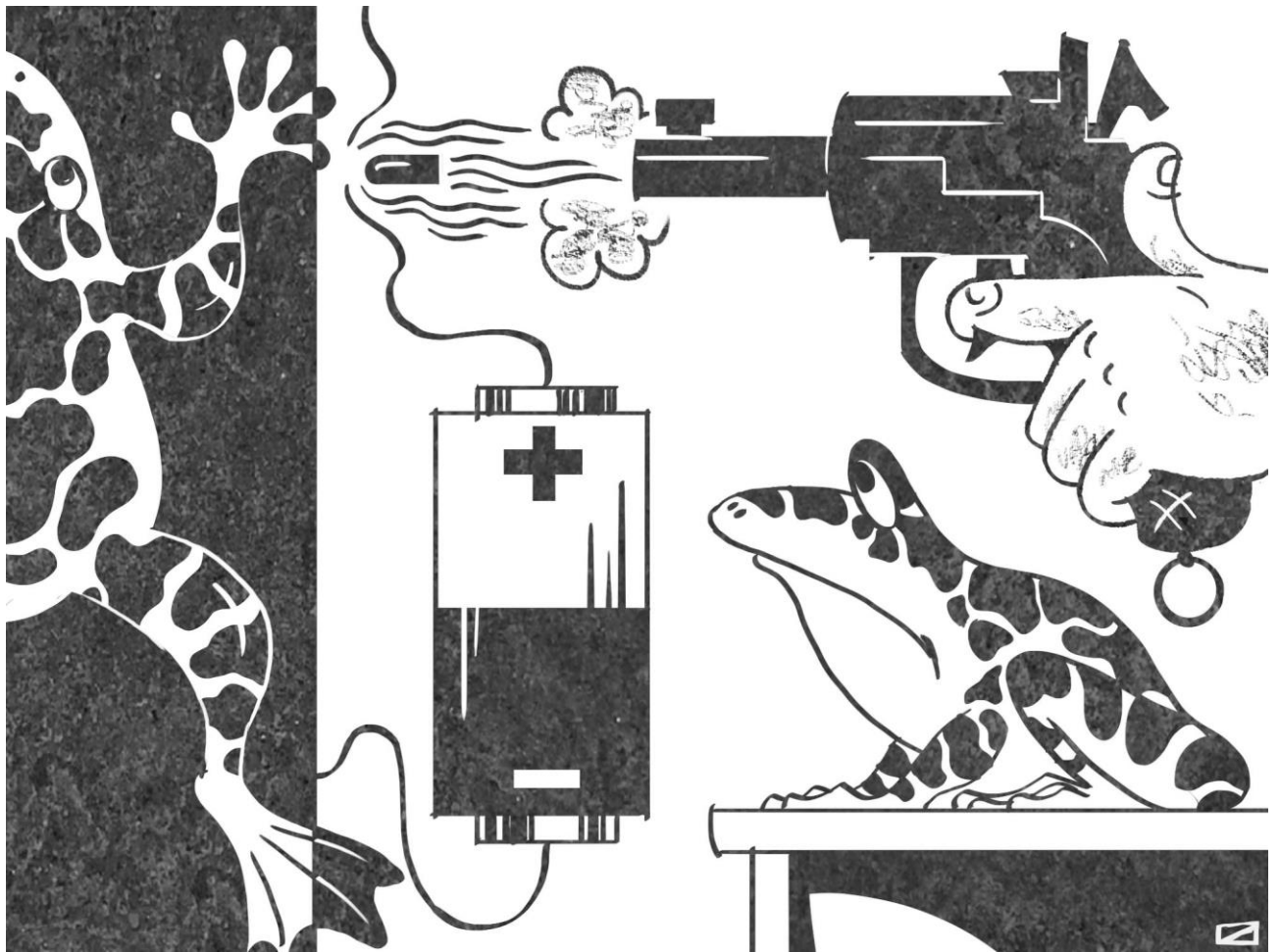
Лабораторные исследования в области электрофизиологии начала XX в. весьма поучительны — в отсутствие сложного технического арсенала, доступного современной науке, учёные были вынуждены полагаться на собственную инженерную смекалку.

В своём первом исследовании^{i,ii} 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 внклеточно. 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 углекислотойⁱⁱⁱ). Изменяя расстояние между проводниками, 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.

Отрывок 3

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».

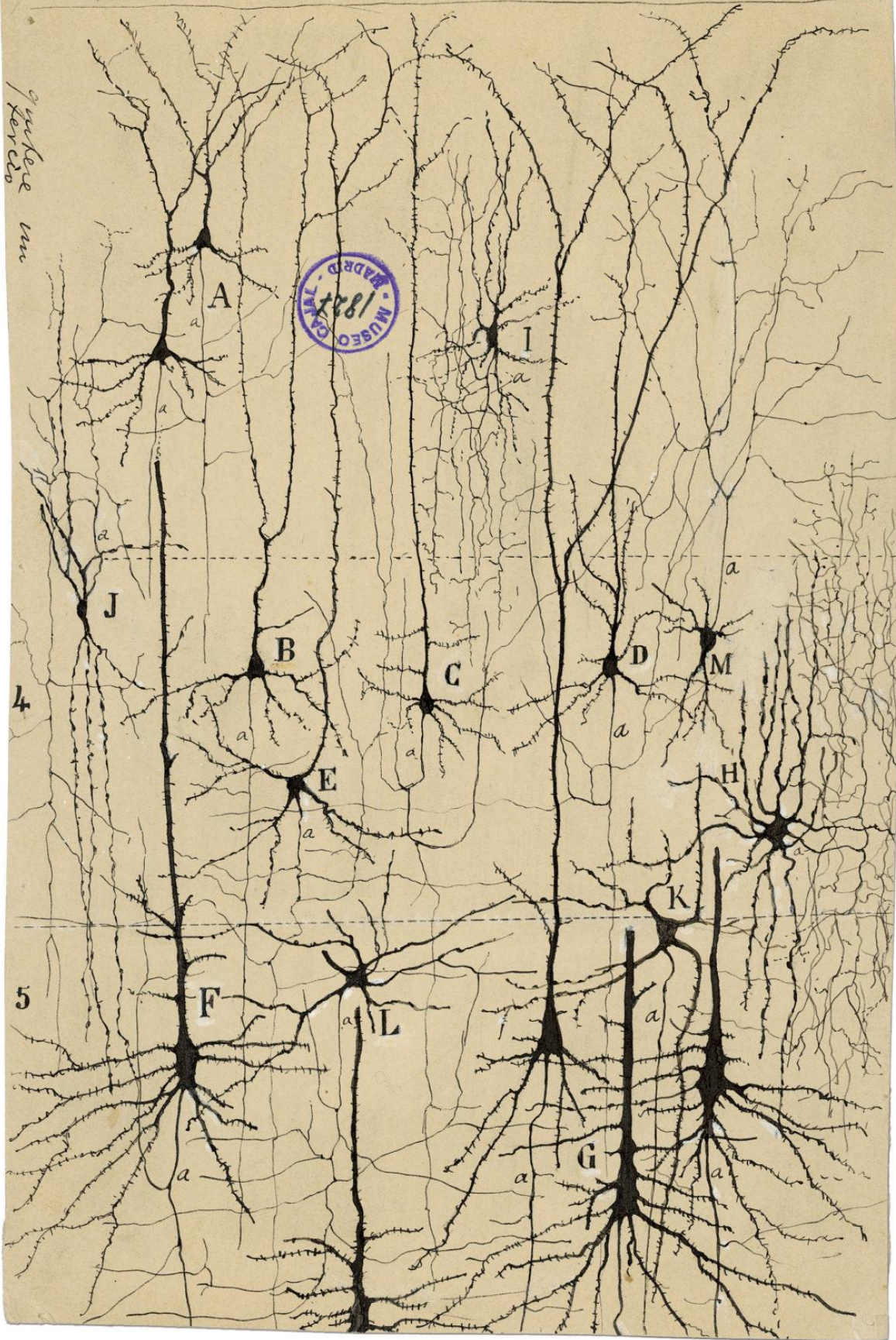
В октябре 1889 г. Рамон-и-Кахаль посетил конгресс Немецкого анатомического общества в Берлине, чтобы представить свои открытия ведущим нейроанатомам. Хотя многие учёные издевались над Рамоном-и-Кахалем и его зарисовками, презентация учёного смогла убедить уважаемого швейцарского гистолога Рудольфа фон Кёлликера. В 1891 г. немецкий анатом Генрих Вильгельм Вальдейер объединил новаторское исследование Рамона-и-Кахалья 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)^{iv}.

В 1906 г. Рамон-и-Кахаль и Камилло Гольджи за труды по строению нервной системы получили Нобелевскую премию в области физиологии и медицины^v.

До наших дней дошло около трёх тысяч зарисовок Рамона-и-Кахалья^{vi}, которые и сегодня остаются одними из самых подробных описаний структурного разнообразия мозга и нервной системы.

quercus un
tercio

MUSEO
NATURAL
1881
MADRID



Отрывок 4

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.

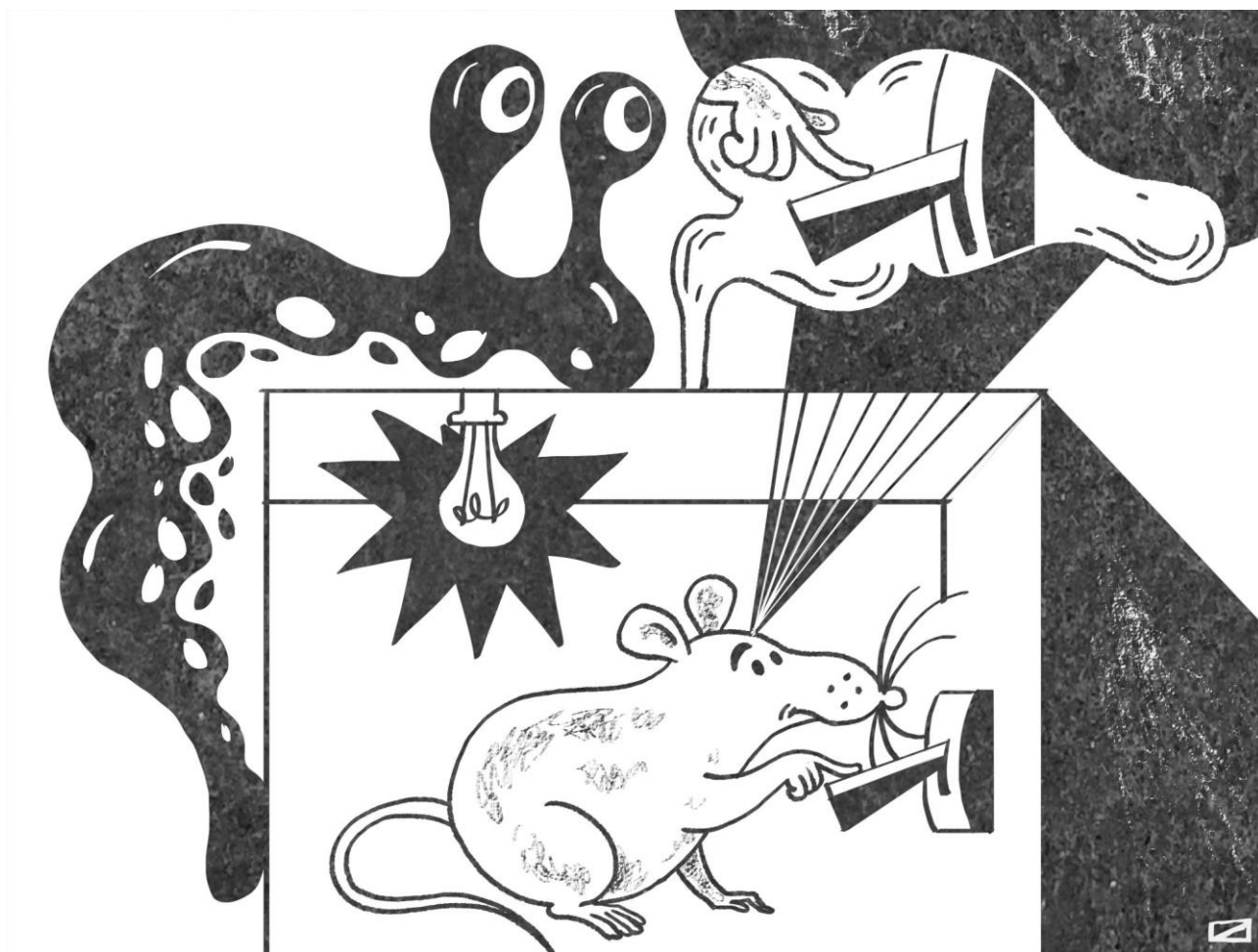


Результаты этого эксперимента потрясли мировоззрение Питтса до основания. Ранее он считал, что мозг обрабатывает информацию при помощи цифровых нейронов и математической логики. Но оказалось, что беспорядочные аналоговые процессы в сетчатке глаза выполняли как минимум часть этой работы. *«После того 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 меланхолической 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...»

Отрывок 5

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 (рибонуклеиновой кислоты), содержащих «адгезивные коды», сигнатуры, заставляющие молекулу связываться с определёнными группами нейронов.

* Интрацистернально здесь — в большую цистерну (лат. *cisterna magna*) подпаутинного пространства головного мозга.

Старт исследованиям группы Розенблатта дали работы других научных коллективов, которыми были продемонстрированы обнадеживающие 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^{vii}. 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)^{viii, ix}. 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^x.

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^{xi}.

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^{xii}. 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.

Отрывок 6

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 микротомы (инструмента для приготовления тонких срезов образцов). Полученные срезы пропустили через электронный микроскоп в Институте медицинских исследований Общества Макса Планка, в результате чего в 2010 г. был сформирован большой массив изображений^{xiii}, 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 мышинного 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).

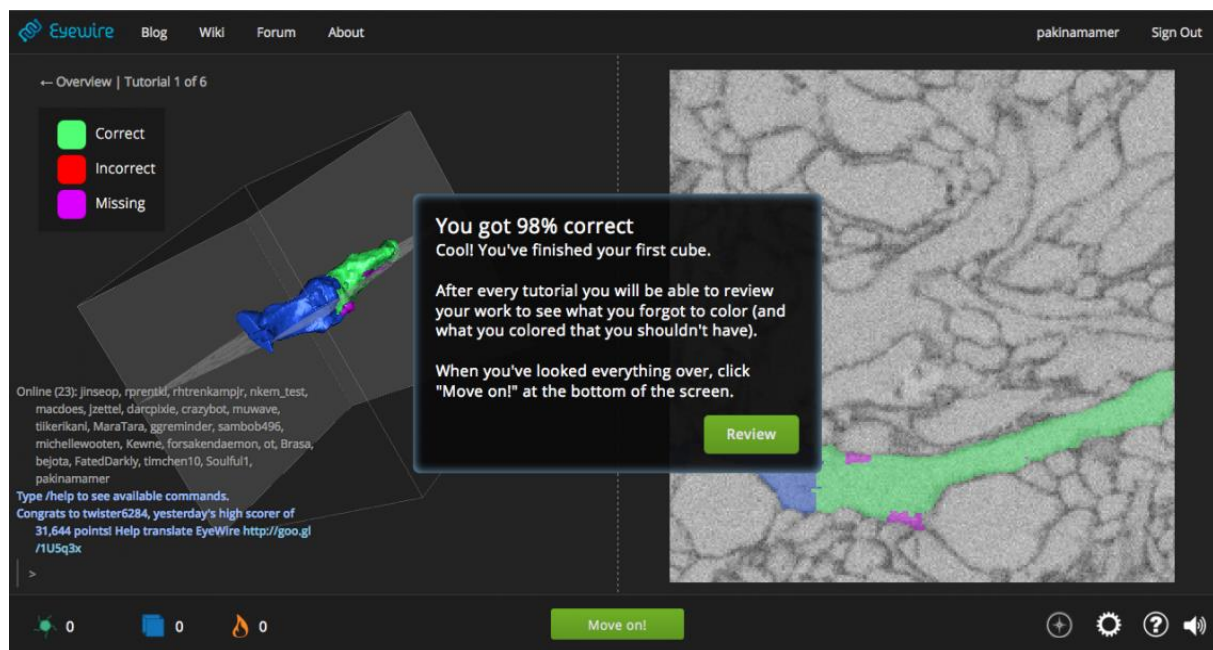


Рис. 84. Игра EyeWire

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^{xiv}.

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.

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^{xv}.

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

* 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.

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^{xvi}. 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.

Отрывок 7

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^{xvii}. 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)^{xviii}. 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 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 невыполнимым»^{xix}.*

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.

* Астроцит (от греч. *άστρον* — звезда и *κύτος* — клетка) — тип нейроглиальной клетки звёздчатой формы с многочисленными отростками.

Отрывок 8

27 октября 2005 г. Евгений Ижикевич выполнил на цифровой машине симуляцию работы импульсной нейронной сети, по размерам превосходящей среднестатистический человеческий мозг. Модель состояла из 100 млрд нейронов и около квадриллиона синапсов. В процессе работы модели возникли альфа- и гамма-ритмы, а также другие интересные явления. Одна секунда симуляции потребовала около 50 дней расчётов на 27-процессорном кластере *Weowulf*^{xx, xxi}.

Более масштабная симуляция была осуществлена только в конце 2012 г. Общественность узнала о ней из записи в блоге американского исследователя индийского происхождения Дхармендры Модхи. В ней учёный сообщил, что, используя 96 стоек *Blue Gene/Q* суперкомпьютера *Sequoia* Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса (*Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL*) (1 572 864 процессорных ядра, 1,5 Пб памяти, 98 304 процесса), работавшие в 6 291 456 потоков, удалось достичь беспрецедентного масштаба симуляции 530 млрд нейронов и 137 триллионов синапсов, работающих всего в 1542 раза медленнее, чем в реальном времени. При этом важно понимать, что модель нейрона, использованная исследователями, была крайне упрощённой — сама симуляция осуществлялась в рамках проекта по созданию системы *TrueNorth*, подробнее о которой мы поговорим в этой главе позже^{xxii}.

Хотя эти результаты и стали рекордными, было ясно, что серьёзные эксперименты, направленные на изучение высших нервных функций, при таких скоростях симуляции вряд ли возможны. Диванные эксперты нередко высказывают суждение о том, что учёные не знают, каким образом работает человеческий мозг. Конечно, это суждение очень наивно. Учёные неплохо знают детали физиологических процессов, протекающих в мозге. Однако сложнее дело обстоит с тем, чтобы объяснить, каким именно образом эти процессы связаны с наблюдаемыми нами психическими феноменами и поведением обладателей мозга. Как устроена память? Как человек или животные распознают или воссоздают образы? Как устроен процесс обучения? Откуда берётся самосознание? И хотя эти вопросы и представляют в ряде случаев затруднения для современных исследователей, проблема заключается вовсе не в том, что у учёных недостаточно объяснений. Скорее в том, что этих объяснений в настоящее время предложено слишком много, и в силу этого они нередко носят спекулятивный характер. Чтобы отсеять неудачные гипотезы, наука нуждается в экспериментальных данных, и важным их источником могут стать вычислительные эксперименты. Для того чтобы создать оборудование, подходящее для подобных задач, необходимо решить проблему пресловутого «бутылочного горлышка фон Неймана» (барьера в скорости вычислений, возникающего из-за задержек в передаче данных через шину). Именно для этого и создаются нейроморфные машины типа I.

Отрывок 9

Развитие механических вычислительных машин в XIX в. с новой силой пробудило страхи людей перед развитием технологий. Вот, к примеру, что писал в 1847 г. преподобный Ричард Торнтон, редактор религиозного журнала *Primitive Exponent* [Простой Толкователь]: «Ум... опережает сам себя и расправляется с необходимостью собственного существования, изобретая машины, которые должны вместо него мыслить... Как знать, однако, не замыслят ли таковые машины, будучи доведены до большого совершенства, устранить все свои недостатки, а затем напечатать идеи, недоступные разуму простого смертного!»^{xxiii, xxiv}

В 1863 г., через четыре года после того, как Чарльз Дарвин опубликовал «Происхождение видов», писатель Сэмюэл Батлер под псевдонимом Cellarius в статье «Дарвин среди машин» (*Darwin among the Machines*)^{xxv} высказал идею о том, что эволюционирующие машины рано или поздно вытеснят человечество как доминирующий вид. Батлер предлагал немедленно уничтожить все машины, чтобы избежать этого печального исхода. Он писал:

Мы имеем в виду вопрос: какими скорее всего будут существа, которые станут доминирующим видом на Земле после людей. Мы часто слышали об этом споре; но нам кажется, что мы сами создаём собственных преемников; мы ежедневно добавляем красоту и тонкость их физической организации; мы ежедневно наделяем их большим могуществом и с помощью всевозможных изобретательных приспособлений снабжаем их той саморегулирующейся, самодействующей силой, которая будет для них тем же, чем стал интеллект для человеческого рода. С течением времени мы обнаружим себя в роли низшей расы. <...> День ото дня машины набирают силу; день ото дня мы становимся более подчинёнными им; всё больше людей ежедневно приковываются к ним, как рабы, чтобы ухаживать за ними, всё больше людей ежедневно посвящают энергию всех своих жизней развитию механической жизни. Результат — это просто вопрос времени, но то, что наступит время, когда машины будут иметь реальное превосходство над миром и его обитателями, — это то, в чём ни один человек с истинно философским складом ума не может ни на мгновение усомниться.

Статья заканчивается пламенным призывом: «Против них должна быть немедленно объявлена смертельная война. Каждую машину любого рода должен уничтожить тот, кто желает добра своему виду. Пусть не будет никаких исключений, ни на йоту; давайте же немедленно вернёмся к первобытному состоянию нашей расы».

В 1872 г. Батлер (вновь анонимно) публикует сатирический роман-антиутопию под названием «Едгин, или За пределом» (*Erewhon: or, Over the Range*)^{xxvi} (слово *Erewhon*, обозначающее вымышленную страну, в которой происходят действия романа, это анаграмма слова *nowhere*, т. е. «нигде», поэтому по-русски её иногда передают как «Едгин»). В этом романе машиноненавистнические идеи Батлера получают дальнейшее развитие. В 1901 г. выходит продолжение романа под названием «Спустя двадцать лет первооткрыватель страны и его сын возвращаются в Едгин» (*Erewhon Revisited Twenty Years Later, Both by the Original Discoverer of the Country and by His Son*)^{xxvii}. Именно в честь Батлера автор вселенной «Дюны» писатель Фрэнк Герберт назвал крестовый поход человечества против компьютеров, мыслящих машин и наделённых разумом роботов Батлерианским джихадом^{xxviii}.

Отрывок 10

Давайте попробуем взглянуть на отношения машин и эмоций в сугубо технологическом ключе, воздерживаясь по возможности от традиционных ловушек в духе очеловечивания всего подряд, а также от чрезмерного упрощения предмета.

Для начала рассмотрим такой интересный вопрос, как эмоции самих машин. Можно ли сказать, что машины испытывают или могут испытывать эмоции? На первый взгляд, это звучит фантастично — ведь машинам пока что не под силу многое из того, что по плечу даже трёхлетнему ребёнку. Мы привыкли считать эмоциональную сферу чем-то мистическим, едва ли не высшим проявлением развития живых существ. Разве можно у современных машин найти что-то, что может быть хотя бы отдалённым аналогом человеческих чувств? Однако более внимательное изучение вопроса показывает, что даже в поведении примитивных организмов наблюдаются явления, которые могут быть интерпретированы как наличие у них чувств. У некоторых моллюсков в результате обучения формируются условные рефлексы, которые заставляют их избегать определённых стимулов. Можно ли это интерпретировать как наличие у них чувства страха? Поиск полового партнёра или пищи, стремление избегать опасностей — что это, если не отдалённые аналоги человеческих чувств и эмоций? Кто-то может сказать, что человеческие чувства не столь прямолинейны, что человек может принести себя в жертву, но разве не приносит себя в жертву самец богомола? Разве много прямолинейности в строительстве птицей шалашником совершенно нефункциональных шалашей, украшенных цветами и ракушками? Конечно, люди имеют куда более сложную нервную систему, чем богомолы, и куда более развитую культуру, чем шалашники, с этим трудно поспорить. Однако что касается чувств, эмоций, то они, по всей видимости, всё-таки довольно базовое явление в животном мире. Способность живых организмов учиться на своём опыте основана на наличии положительного и отрицательного подкрепления. Досада от допущенной ошибки, радость победы, страх перед опасностью, предвкушение удовольствия — все эти явления непосредственно связаны с поведенческими адаптациями. В этом смысле модель машинного обучения, основанная на обучении с учителем (и тем более в случае использования обучения с подкреплением в мультиагентных средах), подобна пусть и примитивному, но живому организму, способному формировать условные рефлексы, менять поведение под воздействием собственных удач или неудач, выборочно относиться к стимулам среды. Наблюдая за поведением AlphaStar или любого другого более-менее сложного бота в игре, мы видим, как программа «проявляет осторожность», отступает, «нащупывает слабые места» противника, «паникует» в тяжёлой ситуации и так далее. Мы невольно интерпретируем действия системы как действия агента, испытывающего определённые чувства. И хотя люди (и даже другие приматы) могут очеловечивать и более примитивные явления, например проявлять нежность к игрушке или разговаривать с собственным автомобилем, в ситуации с нейросетевой моделью для такого очеловечивания есть куда больше оснований, под влиянием которых люди легко ударяются в другую крайность: начинают приписывать существующим системам ИИ наличие у них разума, подобного человеческому, самосознания, коварных планов и так далее. Такие взгляды, помноженные на паранойю, способны создать настоящую гремучую смесь.

¹ Lapique L. (1907). Recherches quantitatives sur l'excitation électrique des nerfs traitée comme une polarisation / 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

ⁱⁱ 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>

ⁱⁱⁱ Горбунов Б. Б., Востриков В. А., Нестеренко И. В., Тельшев 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

^{iv} 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/>

^v 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/>

^{vi} 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/>

^{vii} Røigaard-Petersen, H. H., Nissen, T., Fjerdingsstad, 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>

^{viii} Ungar G., Ocegüera-Navarro C. (1965). Transfer of Habituation by Material extracted from Brain / Nature, vol. 207, 1965, pp. 301–302 // <https://doi.org/10.1038/207301a0>

^{ix} 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>

^x 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>

^{xi} 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>

^{xii} 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>

^{xiii} 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>

^{xiv} 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>

^{xv} Коровски Ю. (2015). Игры ради науки / XX2 век, 23 марта // <https://22century.ru/popular-science-publications/games-for-science>

^{xvi} 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>

^{xvii} 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>

^{xviii} 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>

^{xix} DeWeerd S. (2019). How to map the brain / Nature, Vol. 571, S6-S8, 24 July 2019 // <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02208-0>

^{xx} Izhikevich E. M. (2007). Dynamical Systems in Neuroscience. MIT Press // <https://books.google.ru/books?id=kVjM6DFk-twC>

^{xxi} Izhikevich E. M. (2005). Simulation of Large-Scale Brain Models / The Neurosciences Institute: Eugene M. Izhikevich // https://www.izhikevich.org/human_brain_simulation/Blue_Brain.htm

^{xxii} Wong T. M., Preissl R., Datta P., Flickner M., Singh R., Esser S. K., McQuinn E., Appuswamy R., Risk W. P., Simon H. D., Modha D. S. (2012). 1014. IBM Research Report, RJ10502 (ALM1211-004), November 13, 2012 // <https://dominoweb.draco.res.ibm.com/reports/RJ10502.pdf>

^{xxiii} Thornton R. (1847). The Age of Machinery / Primitive Expounder, Devoted to Theoretical and Practical Religion, Expounded in Its Primitive Purity, Excellence and Loveliness by R. Thornton & J. Billings, Vol. 4 // https://books.google.ru/books?id=ZM_hAAAAAAJ

^{xxiv} Рассел С. (2021). Совместимость: как контролировать искусственный интеллект. — М.: Альпина нон-фикшн // <https://www.google.ru/books?id=OacEAAAQBAJ>

^{xxv} Cellarius (1863). Darwin Among the Machines [To the Editor of the Press, Christchurch, New Zealand, 13 June, 1863.] // <http://nzetc.victoria.ac.nz/tm/scholarly/tei-ButFir-t1-g1-t1-g1-t4-body.html>

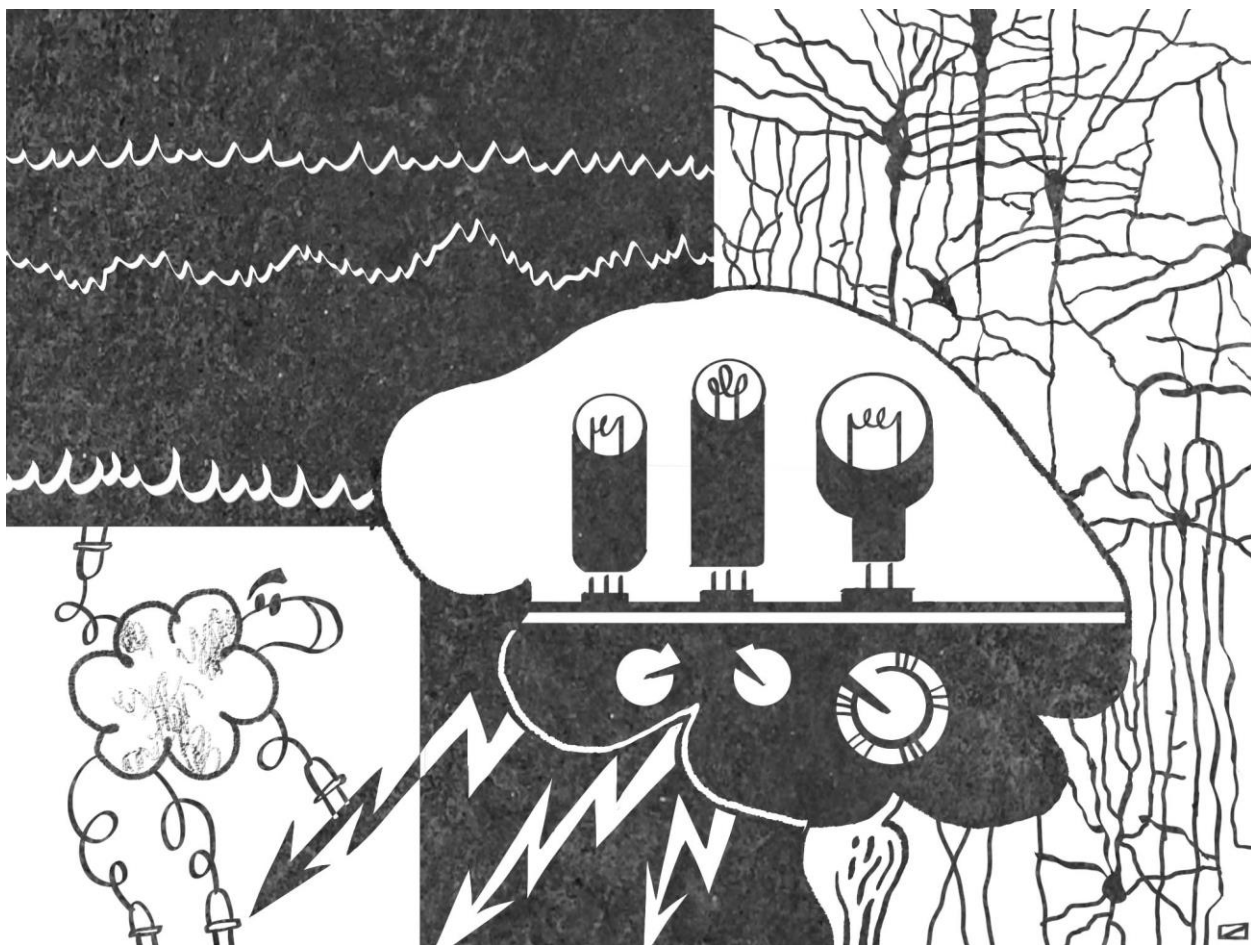
^{xxvi} Butler S. (2017). Erewhon, Or Over the Range. CreateSpace Independent Publishing Platform // <https://books.google.ru/books?id=d6x9tAEACAAJ>

^{xxvii} Butler S. (2019). Erewhon Revisited Twenty Years Later, Both by the Original Discoverer of the Country and by His Son. Good Press // <https://books.google.ru/books?id=8sPCDwAAQBAJ>

^{xxviii} Hsu S. (2016). The Butlerian Jihad and Darwin among the Machines / Michigan State University, Spartan Ideas, March 29, 2016 // <https://spartanideas.msu.edu/2016/03/29/8624/>

Отрывки из книги Сергея Маркова для канала "Антропогенез"
(темы: биология, мозг, эмоции)

Отрывок 11



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^{xxviii} 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»*^{xxviii}.

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^{xxviii}.

<...>

Также, практически случайно, Катон смог уловить слабый электрический ток и сквозь нескрытую черепную коробку: это стало первым опытом в области неинвазивной (т. е. не связанной с проникновением через естественные внешние барьеры организма) электроэнцефалографии^{xxviii}.

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^{xxviii}.

Работа Катона, впрочем, оставалась не замеченной научным сообществом в течение пятнадцати лет — научная коммуникация в конце XIX в. была довольно медленной.

Отрывок 12

Приоритет же в получении первой человеческой электроэнцефалограммы принадлежит немецкому нейропсихиатру* Хансу Бергеру.

<...>

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^{xxviii, xxviii}.

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^{xxviii}.

<...>

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.

<...>

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 биндажа^{xxviii}.

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.

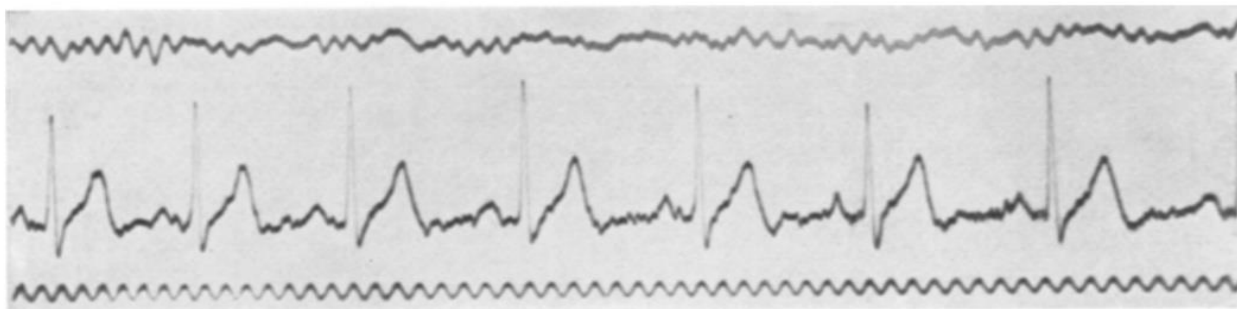


Рис. 78. Пример электроэнцефалограммы из доклада Бергера

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^{xxviii, xxviii}.

Более поздние отчёты Бергера, вышедшие 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.

Отрывок 13

...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:

...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.

<...>

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 Бейтендейка. 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^{xxviii}.

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^{xxviii}. В 1944 г. Нобелевскую премию получили и Гассер с Эрлангером — «за открытия, имеющие отношение к высокодифференцированным функциям отдельных нервных волокон»^{xxviii}.

Отрывок 14

Первый коннектом [напоминаем, что коннектом — это карта связей нейронов в нервной ткани] 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^{xxviii}. 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^{xxviii}. 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^{xxviii}.

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^{xxviii}. 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^{xxviii, xxviii}.

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 (НМИ) 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^{xxviii}. 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*)^{xxviii}, 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?



Отрывок 15

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 А находится достаточно близко, чтобы возбудить клетку В, 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 А как одной из клеток, возбуждающих В, растёт»*. Часто этот принцип афористично формулируют так: «нейроны, которые возбуждаются вместе, связываются вместе» [*neurons that fire together, wire together*].

<...>

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 измерял 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^{xxviii}.



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»^{xxviii}.

Отрывок 16

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 «мышь» 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 попытаться счастья с кибернетическими черепаками, 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)^{xxviii, xxviii, xxviii}.

Отрывок 17

Как правило, первое, что приходит в голову неспециалисту при упоминании имени Зигмунда Фрейда, — это либидо, эго, сублимация, концепция зависти к пенису и другие сомнительные фрейдистские конструкты, научная ценность которых сегодня иногда вызывает серьёзные сомнения. Специалисты обычно обращают внимание на важный вклад Фрейда в дело становления научной психологии (например, на развитие концепции бессознательного). Но даже представители академической психологии не всегда в курсе того, что до того, как стать отцом-основателем психоанализа, Фрейд специализировался в области неврологии, занимался пионерскими нейробиологическими исследованиями, которые привлекли внимание Сантьяго Рамона-и-Кахаля и повлияли на становление нейробиологии как дисциплины. Более-менее полным собранием идей Фрейда в этой области является эссе, известное сегодня под названием «Проект научной психологии» (Project for a Scientific Psychology) или «Пролог к научной психологии» (Prologue to a Scientific Psychology). Разночтения в названии работы в данном случае вполне объяснимы: в немецком издании оно названо «Наброски психологии» (Entwurf einer Psychologie), однако название это было выбрано редакторами, оригинальная работа Фрейда оставлена без заголовка^{xxviii}.

<...>

Изначально Фрейд планировал изучать право, однако в итоге остановил выбор на медицинском факультете^{xxviii}. На втором году обучения Зигмунд начал свои первые научные исследования, объектом которых стали половые органы угря. Эта работа, осуществлявшаяся под руководством знаменитого профессора-эволюциониста Карла Клауса, была, по общему мнению, весьма хорошей, однако сам Фрейд был разочарован её результатами и, возможно, встревожен перспективой расчленения в будущем ещё большего количества угрей^{xxviii}. Поэтому в 1877 г. он перебирается в лабораторию знаменитого немецкого физиолога Эрнста фон Брюкке, где главным направлением его исследований становится изучение нервной ткани человека и других живых организмов.

<...>

Шесть лет Фрейд провёл в лаборатории Брюкке, занимаясь сравнительной анатомией нервной системы позвоночных и беспозвоночных. Изучая под микроскопом мозг лягушек, раков и миног, он совершил ряд важных открытий. В

частности, именно Фрейд обнаружил, что нервные волокна берут своё начало в сером веществе, покрытом паутиноподобной тканью, и что спинной мозг миноги содержит недифференцированные клетки, которые впоследствии формируют корешки чувствительных нервов. Также он был первым, кто описал структуру и функции продолговатого мозга и проводящих путей, соединяющих спинной мозг и мозжечок.

Это было время острых дебатов, предшествовавших становлению нейронной доктрины. Ещё в 1830-е гг. Теодор Шванн и Маттиас Шлейден на основании данных микроскопии предположили, что все живые существа состоят из фундаментальных единиц, названных клетками. Однако вплоть до открытия «чёрной реакции» микроскопия была неспособна опровергнуть точку зрения сторонников Герлаха о том, что волокна, соединяющие клеточные тела в мозге, составляют структурно неразделимую сеть — ретикулум, поскольку синаптические щели были неразличимы в отсутствие подходящего способа окраски. Окончательное признание научным сообществом «нейронной доктрины» произошло в самом конце XIX в., когда британский нейробиолог Чарльз Шеррингтон исследовал явление синаптической связи.

Фрейд разработал свой оригинальный способ окраски ткани, наминавший метод Гольджи. Первым компонентом окраски был, так же как и в случае «чёрной реакции», дихромат калия или жидкость Эрлицкого (2½ части дихромата калия и ½ части сульфата меди на 100 частей воды), а вот вторым — смесь равного (или половинного) объёма этилового спирта с однопроцентным водным раствором хлорида золота^{xxviii, xxviii}. В 1884 г. Фрейд публикует описание своего метода окраски в престижном научном журнале *Brain*^{xxviii}. В лекции, прочитанной в том же году, Фрейд так описал свои наблюдения: *«Если мы предположим, что фибриллы (нитевидные белковые структуры. — С. М.) нервного волокна играют роль изолированных проводящих путей, то мы должны признать, что пути, на которые разделены нервные волокна, сливаются в нервной клетке, — тогда нервная клетка становится „началом“ всех этих нервных волокон, анатомически связанных с ней... Я не знаю, достаточно ли существующих материалов для решения этой важной задачи. Если это предположение удалось бы подтвердить, это стало бы большим шагом вперёд в отношении физиологии нервных элементов: мы могли бы представить, что стимул определённой силы будет способен пробивать изолированные волокна так, что нерв, как единое целое, послужит проводником возбуждения и так далее»*^{xxviii, xxviii}.

Эта цитата показывает, что Фрейд вплотную приблизился к открытию нейронной доктрины, однако его суждения содержали изрядную степень неопределённости, которую спустя шесть лет смогли преодолеть Рамон-и-Кахаль и Вальдейер. В своей знаменитой работе «Гистология нервной системы человека и позвоночных» Рамон-и-Кахаль ссылается на наблюдения Фрейда как на свидетельства в пользу правильности нейронной доктрины^{xxviii}.

Отрывок 18



Эксперименты Хьюбела и Визеля стали продолжением исследований Штефана Куффлера ^{xxviii}, американского нейрофизиолога венгерского происхождения, которого иногда называют отцом современной нейрофизиологии ^{xxviii}. Именно Куффлер в 1953 г. провёл первый экспериментальный анализ зрительной системы млекопитающих, сосредоточившись на организации рецептивного поля и значении сигналов в зрительном нерве кошки.

Как и Куффлер, Хьюбел и Визель использовали единичные электроды для регистрации активности отдельных нейронов. Эта процедура может показаться весьма неплодотворным способом изучения функций, в которых участвует большое количество клеток. Какова вероятность того, что исследователи смогут понять сложные закономерности работы мозга, наблюдая активность безнадёжно малой доли общего числа нейронов? Однако упорядоченный характер структуры связей клеток зрительной коры существенно упростил задачу Хьюбела и Визеля: смежные точки сетчатки соответствуют смежным точкам поверхности коры. Первичная зрительная зона коры устроена таким образом, что каждому крошечному сегменту поля зрения соответствует идентичный набор нейронных анализаторов. Задача, с которой столкнулись Хьюбел и Визель в 1958 г., состояла в том, чтобы выяснить, как сигналы, обозначающие маленькие, яркие, тёмные или цветные пятна в сетчатке, преобразовываются в сигналы, которые передают информацию о форме, размере, цвете, движении и глубине объектов, в то время как современные методы нейровизуализации (пометка нейронов при помощи инъекции пероксидазы хрена, диффузная оптическая томография и другие) ещё не были созданы^{xxviii}.

И всё-таки исследователей ждал успех. Вот так Хьюбел описал в своей нобелевской речи эксперимент, который привёл к прорыву в понимании функций первичной зрительной коры:

Наше первое настоящее открытие случилось совершенно неожиданно. На протяжении двух или трёх часов у нас ничего не получалось. Затем постепенно мы начали различать какие-то смутные и непостоянные ответы при стимуляции где-то на границе между центром и периферией сетчатки. Мы как раз вставляли слайд на стекле в виде тёмного пятна в разъем офтальмоскопа, когда внезапно, через аудиомонитор (по сути обычный динамик — устройство, преобразующее электрические импульсы в звуковые сигналы. — С. М.), клетка зарядила как пулёмёт. Спустя некоторое время, после небольшой паники, мы выяснили, что же случилось. Конечно, сигнал не имел никакого отношения к тёмному пятну. Во время того, как мы вставляли слайд на стекле, его край отбрасывал на сетчатку слабую, но чёткую тень в виде прямой тёмной линии на светлом фоне. Это было именно то, чего хотела клетка, и, более того, она хотела, чтобы эта линия имела строго определённую ориентацию. Это было неслыханно. Сейчас даже трудно подумать и представить себе, насколько далеко мы были от какой-либо идеи относительно того, какую роль могут играть клетки коры в обычной жизни животного^{xxviii}.

Статья Хьюбела и Визеля «Рецептивные поля отдельных нейронов в стриарной коре кошки» (Receptive fields of single neurons in the cat's striate cortex)^{xxviii} увидела свет в 1959 г., практически одновременно со статьёй Летвина и Матураны о глазе и мозге лягушки и за два года до «Принципов нейродинамики» Розенблатта. Производя обзор находок нейрофизиологов, Розенблатт отмечает, что высказанная им в статье 1958 г. идея об архитектуре сети, способной распознавать контуры объектов и основанной на нейронах А-слоя с круговыми или эллиптическими распределениями входящих синапсов, вполне соотносится с данными Хьюбела и Визеля...

Важной особенностью корковых (также говорят «кортикальных», от лат. *corticalis* — кора) карт является их переменный масштаб: одна и та же площадь поверхности тела, в зависимости от конкретного участка, может отображаться в различные по площади участки коры. Например, квадратному миллиметру поверхности пальцев, губ или языка соответствует бóльшая площадь коры, чем квадратному миллиметру поверхности ягодиц или спины, а квадратный миллиметр центральной части сетчатки глаза представлен в коре мозга примерно в 35 раз детальнее, чем квадратный миллиметр её периферической части.

Во многих учебниках по нейрофизиологии можно обнаружить изображение удивительного существа — соматосенсорного гомункулуса. В основу гомункулуса положена фигурка человека, но размеры разных анатомических областей его тела выполнены в масштабе, пропорциональном числу находящихся в них рецепторов и, соответственно, площади, приходящейся на эти анатомические области зоны соматосенсорной коры.

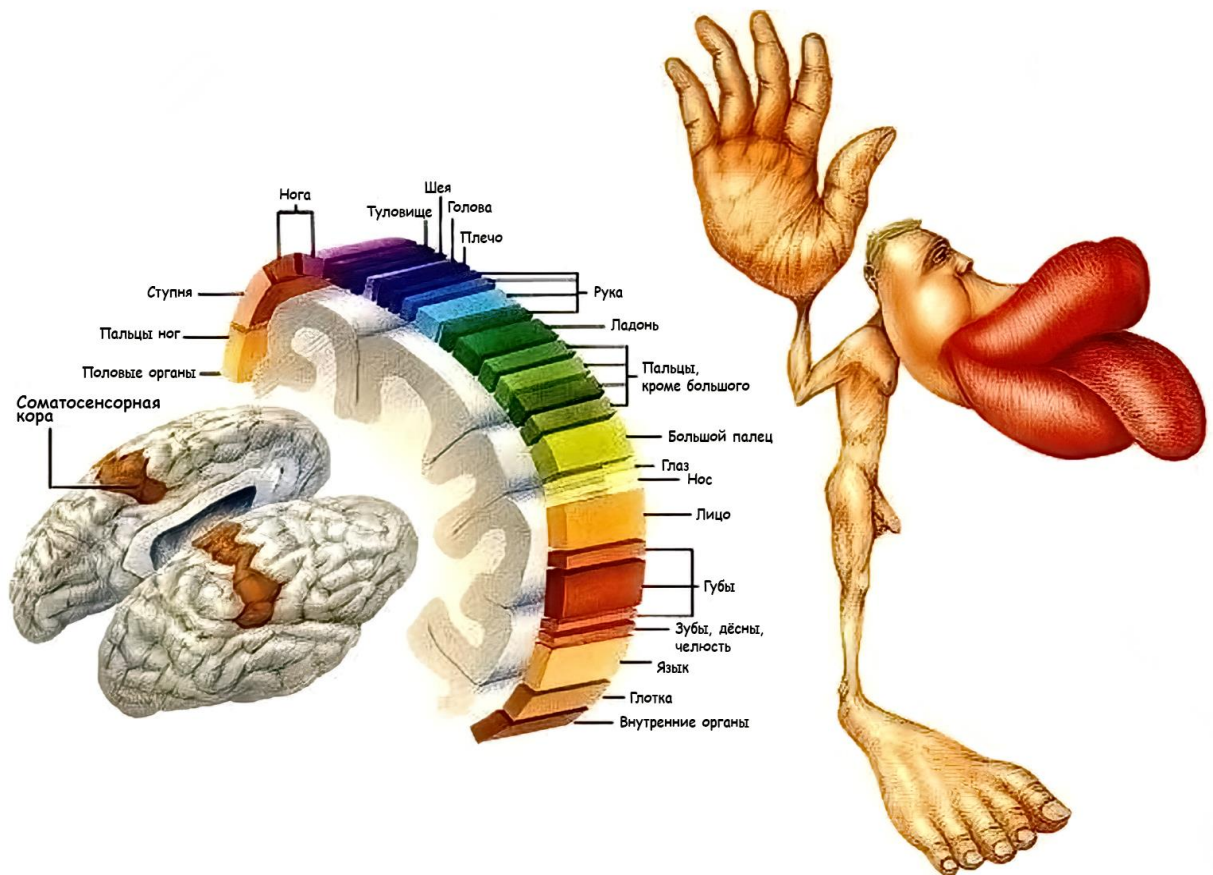


Рис. 102. Соматосенсорный гомункулус

Эта особенность кортикальных карт была задокументирована в начале 1940 гг. — в пионерских исследованиях Клинтона Вулси^{xxviii} и Эдгара Эдриана^{xxviii}, в которых было отмечено, что частям тела, обладающим наибольшей чувствительностью, соответствуют наибольшие по площади зоны кортикальных проекций^{xxviii}.

Иногда части тела гомункулуса располагают вдоль схематического изображения коры, что делает его ещё страшнее.

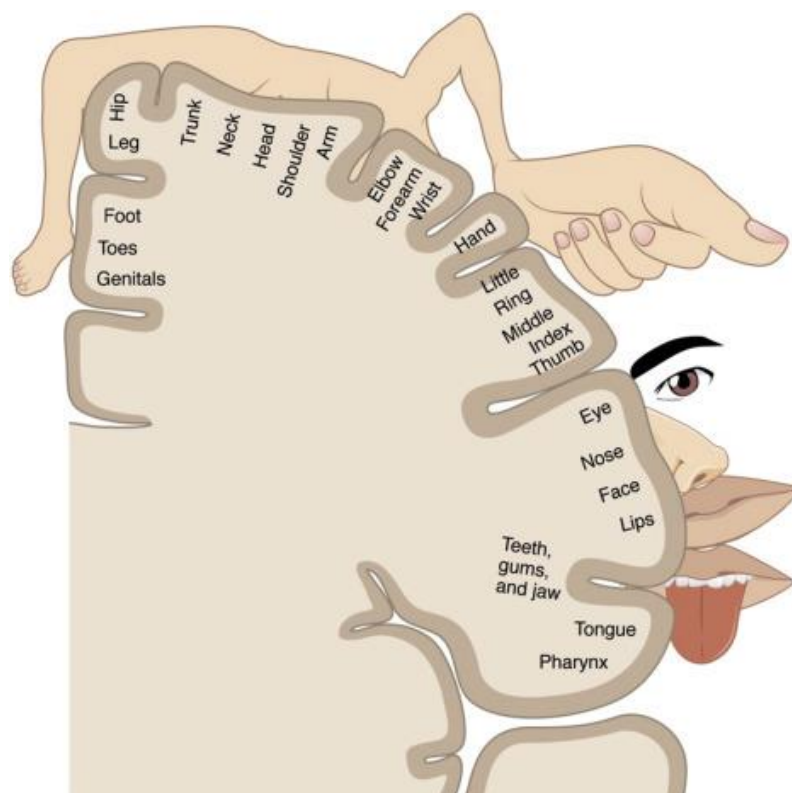
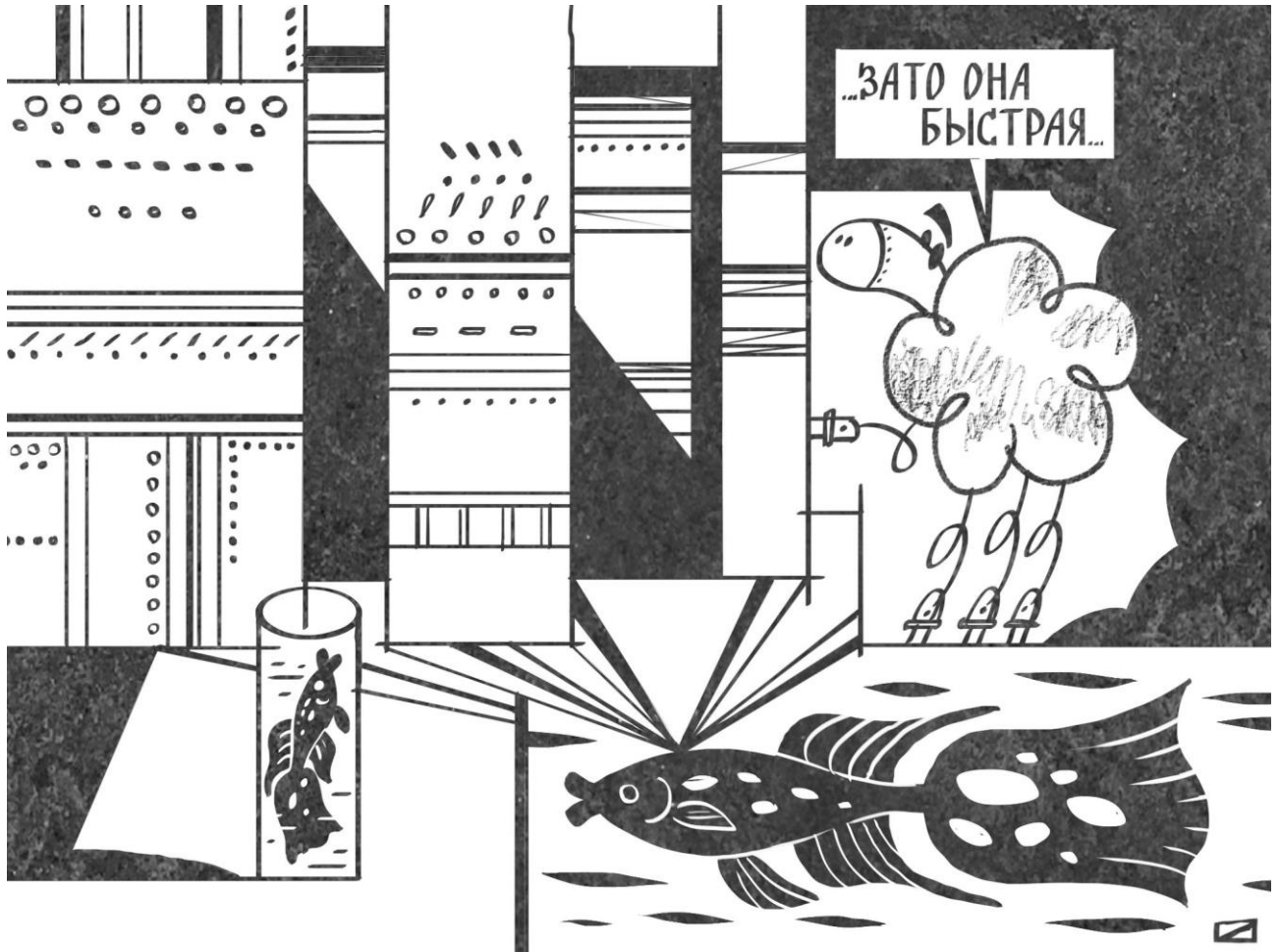


Рис. 103. Схематичное изображение коры мозга и соответствующих ей частей тела

Отрывок 20

В основе другой системы, BrainScaleS (NM-PM-1), разработанной в рамках Human Brain Project, находится 20 неразрезанных кремниевых пластин диаметром 200 мм, каждая из которых включает в себя 384 микросхемы со смешанным типом сигналов — так называемые микросхемы аналоговых нейронных сетей с большим количеством входов (High Input Count Analog Neural Network chip, HICANN). Эти микросхемы физически эмулируют работу сети импульсных нейронов с настраиваемыми синапсами. Единая пластина позволяет организовать широкополосную асинхронную инфраструктуру передачи сигналов. Пластина также соединена с 48 модулями связи на базе FPGA (т. е. каждый модуль соединён с восьмью микросхемами HICANN), обеспечивающими возможность подключения к другим модулям на основе таких же пластин [wafer modules], а также к центральной ЭВМ, используемой для настройки и управления системой. Каждая микросхема HICANN реализует как минимум 114 688 программируемых динамических синапсов и до 512 нейронов, что даёт в сумме около 44 млн синапсов и до 196 608 нейронов на один модуль пластины. Точное количество нейронов зависит от конфигурации системы, которая позволяет объединять несколько нейронных ячеек для увеличения количества входных синапсов в одной клетке.

В сумме система из 20 модулей позволяет симулировать сеть размером до почти 4 млн нейронов. Это немногим меньше, чем содержится в мозге рыбки гуппи, счастливой обладательницы примерно 4,3 млн нейронов. Несмотря на сравнительно скромный по меркам животного мира размер сети, эмулируемой BrainScaleS, машина обладает важным преимуществом: скорость её работы в 1000–10 000 раз выше, чем у биологических систем^{xxviii, xxviii, xxviii}.



В феврале 2017 г. группа учёных, занятых в Human Brain Project, представила работу, описывающую прогресс в области создания второй версии BrainScaleS. В экспериментальных микросхемах на смену 180-нанометровой технологии пришла более совершенная, 65-нанометровая технология. Кроме того, большое внимание учёные уделяют реализации на аппаратном уровне алгоритмов обучения импульсных нейронных сетей^{xxviii, xxviii}.

^{xxviii} Robbins J. (2008). A Symphony in the Brain: The Evolution of the New Brain Wave Biofeedback. Grove Press // <https://books.google.ru/books?id=ucRimHppmv0C>

^{xxviii} Niedermeyer E., Silva F. d. (2005). Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields. Lippincott Williams & Wilkins // <https://books.google.ru/books?id=tndqYGPHQdEC>

^{xxviii} Robbins J. (2008). A Symphony in the Brain: The Evolution of the New Brain Wave Biofeedback. Grove Press // <https://books.google.ru/books?id=ucRimHppmv0C>

^{xxviii} Robbins J. (2008). A Symphony in the Brain: The Evolution of the New Brain Wave Biofeedback. Grove Press // <https://books.google.ru/books?id=ucRimHppmv0C>

^{xxviii} Niedermeyer E., Silva F. d. (2005). Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields. Lippincott Williams & Wilkins // <https://books.google.ru/books?id=tndqYGPHQdEC>

- xxviii 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/>
- xxviii Rooney A. (2017). The History of Neuroscience. The Rosen Publishing Group, Inc // <https://books.google.ru/books?id=Hd1hDwAAQBAJ>
- xxviii Radin D. (2009). Entangled Minds: Extrasensory Experiences in a Quantum Reality. New York: Paraview Pocket Books // <https://books.google.ru/books?id=sUM1Hc-KwJQC>
- xxviii 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>
- xxviii Niedermeyer E., Silva F. d. (2005). Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields. Lippincott Williams & Wilkins // <https://books.google.ru/books?id=tndqYGPHQdEC>
- xxviii 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>
- xxviii 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>
- xxviii Adrian E. D. (1932). Nobel Lecture, December 12, 1932 // <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1932/adrian/lecture/>
- xxviii 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/>
- xxviii 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>
- xxviii 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>
- xxviii DeWeerd S. (2019). How to map the brain / Nature, Vol. 571, S6-S8, 24 July 2019 // <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02208-0>
- xxviii 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>
- xxviii 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>
- xxviii 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>
- xxviii 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>
- xxviii 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>
- xxviii Thorndike E. L., Bruce D. (1970). Animal Intelligence: Experimental Studies. Transaction Publishers // <https://books.google.ru/books?id=Go8XozILUJYC>
- xxviii Thorndike E. L. (1932). The Fundamentals Of Learning. Teachers College, Columbia University // <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.157080/page/n29>
- xxviii 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>
- xxviii Марш А. (2020). Познакомьтесь с кибернетической черепахой, предшественником Roomba / Пер. с англ. Голованов А. / Хабр, 24 марта 2020 // <https://habr.com/ru/post/493482/>
- xxviii 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
- xxviii Freud S. (1950). Project for a Scientific Psychology (1950[1895]). The Standard Edition of the Complete Psychological Works of Sigmund Freud, Volume I (1886-1899): Pre-Psycho-Analytic Publications and Unpublished Drafts // <http://users.clas.ufl.edu/burt/freud%20fleiss%20letters/200711781-013.pdf>
- xxviii Rice E. (1990). Freud and Moses: The Long Journey Home. SUNY Press // <https://books.google.ru/books?id=g5JFAGAAQBAJ>
- xxviii Costandi M. (2014). Freud was a pioneering neuroscientist / The Guardian, 10 Mar // <https://www.theguardian.com/science/neurophilosophy/2014/mar/10/neuroscience-history-science>
- xxviii Galbis-Reig D. (2003). Sigmund Freud, M. D.: Forgotten Contributions to Neurology, Neuropathology, and Anesthesia / Internet Journal of Neurology. Vol. 3 (1), Jan 2003 // https://www.researchgate.net/publication/275833594_Sigmund_Freud_MD_Forgotten_Contributions_to_Neurology_Neuropathology_and_Anesthesia
- xxviii Triarhou L. C. (2009). Exploring the mind with a microscope: Freud's beginnings in Neurobiology / Hellenic Journal of Psychology // https://www.academia.edu/9914521/Exploring_the_mind_with_a_microscope_Freuds_beginnings_in_Neurobiology
- xxviii Freud S. (1885). A new histological method for the study of nerve-tracts in the brain and spinal chord / Brain: a journal of neurology, Vol. IV // <https://archive.org/details/brainjournalofne07londonuoft/page/86>

-
- xxviii Barford D., Geerardyn F., van de Vijver G. (2018). *The Pre-Psychoanalytic Writings of Sigmund Freud*. Routledge // <https://books.google.ru/books?id=Fx-yDwAAQBAJ>
- xxviii Reshe J. (2018). Freud's living corpse: psychoanalysis vs neuroscience / *Brev Spread*, Vol. 18, pp. 20—37 // https://www.academia.edu/37323128/Freuds_living_corpse_pschoanalysis_vs_neuroscience
- xxviii Ramón y Cajal S. (2002). *Texture of the Nervous System of Man and the Vertebrates: Volume III An annotated and edited translation of the original Spanish text with the additions of the French version by Pedro Pasik and Tauba Pasik*. Springer Science & Business Media // <https://books.google.ru/books?id=DMETOdFijwMC>
- xxviii Nicholls J. G., Martin A. R., Fuchs P. A., Brown D. A., Diamond M. E., Weisblat D. A. (2012). *From Neuron to Brain*. Sinauer // <https://books.google.ru/books?id=eTLzXwAACAAJ>
- xxviii Erling N. (2016). *Nobel Prizes And Notable Discoveries*. World Scientific // <https://books.google.ru/books?id=IU4tDQAAQBAJ>
- xxviii Nicholls J. G., Martin A. R., Fuchs P. A., Brown D. A., Diamond M. E., Weisblat D. A. (2012). *From Neuron to Brain*. Sinauer // <https://books.google.ru/books?id=eTLzXwAACAAJ>
- xxviii Цит. по: Николлс Д., Мартин Р., Валлас Б., Фукс П. (2017). *От нейрона к мозгу* / изд. 4-е. — М.: УРРС: Книжный дом «Либерком».
- xxviii Hubel D. H., Wiesel T. N. (1959). Receptive fields of single neurons in the cat's striate cortex / *Journal of Physiology*, 1959, vol. 148, pp. 574—591 // <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1959.sp006308>
- xxviii Woolsey C. N., Marshall W. H., Bard P. (1942). Representation of cutaneous tactile sensibility in the cerebral cortex of the monkey as indicated by evoked potentials / *Bulletin of the Johns Hopkins Hospital*, Vol. 70, pp. 399—441.
- xxviii Adrian E. D. (1943). Afferent areas in the brain of ungulates / *Brain*, Vol. 66, Iss. 2, pp. 89—103 // <https://doi.org/10.1093/brain/66.2.89>
- xxviii Catania K. C. (2007). *Evolution of the Somatosensory System — Clues from Specialized Species* / Kaas J. S. (2007). *Evolution of Nervous Systems: a comprehensive reference* // <https://books.google.ru/books?id=UX1PAQAAIAAJ>
- xxviii Davison A. P., Müller E., Schmitt S., Vogginger B., Lester D., Pfeil T. (2020). *HBP Neuromorphic Computing Platform Guidebook*. Release 2020-01-21 09:32:46 (cc9c98a) / Human Brain Project — Neuromorphic Computing Platform // <https://flagship.kip.uni-heidelberg.de/jss/FileExchange/HBPNeuromorphicComputingPlatformGuidebook.pdf?fid=1504&s=qqdXDg6HuX3&uID=65>
- xxviii Schmitt S., Klähn J., Bellec G., Grüb A., Güttler M., Hartel A., Hartmann S., Husmann D., Husmann K., Jeltsch S., Karasenko V., Kleider M., Koke C., Kononov A., Mauch C., Müller E., Müller P., Partzsch J., Petrovici M. A., Schiefer S., Scholze S., Thanasoulis V., Vogginger B., Legenstein R., Maass W., Mayr C., Schüffny R., Schemmel J., Meier K. (2017). *Neuromorphic Hardware In The Loop: Training a Deep Spiking Network on the BrainScaleS Wafer-Scale System* / 2017 International Joint Conference on Neural Network // <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2017.7966125>
- xxviii Hardware (2020) / Human Brain Project // <https://www.humanbrainproject.eu/en/silicon-brains/how-we-work/hardware/>
- xxviii Schemmel J., Kriener L., Müller P., Meier K. (2017). *An Accelerated Analog Neuromorphic Hardware System Emulating NMDA- and Calcium-Based Non-Linear Dendrites* // 2017 International Joint Conference on Neural Networks // <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2017.7966124>
- xxviii Schmitt S., Müller E. (2019). *BrainScaleS Hands-On Tutorial: Overview* / NICE Workshop, 2019 // https://niceworkshop.org/wp-content/uploads/2019/04/NICE-2019-Day-4a_BrainScaleS-Overview.pdf