

# КУРСЫ: «ХИМИЯ ДЛЯ ВСЕХ»

Август 1964 г.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЧТЕНИЯ В КАНИКУЛЯРНОЕ ВРЕМЯ

## НЕРВНЫЕ ИМПУЛЬСЫ —

## АЗБУКА МОЗГА —

## ИМЕЮТ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКУЮ ПРИРОДУ

*Читательница журнала А. Горбунова (деревня Цыбино, Московской области) пишет нам: «Меня интересует механизм передачи сигналов по нервным клеткам».*

Кандидат биологических наук Л. ЧАЙЛАХЯН,  
научный сотрудник Института биофизики АН СССР.

**М**озг человека, без сомнения, высшее достижение природы. В килограмме нервной ткани заключена квинтэссенция всего человека, начиная от регуляции жизненных функций — работы сердца, легких, пищеварительного тракта, печени — и кончая его духовным миром. Здесь — наши мыслительные способности, все наше мироощущение, память, разум, наше самосознание, наше «я». Познание механизмов работы мозга — это познание самого себя.

Велика и заманчива цель, но неизмеримо сложен объект исследования. Шутка сказать, этот килограмм

ткани представляет собой сложнейшую систему связи десятков миллиардов нервных клеток.

Однако первый существенный шаг к познанию работы мозга уже сделан. Может быть, он один из самых легких, но он чрезвычайно важен для всего дальнейшего.

Я имею в виду исследование механизма передачи нервных импульсов — сигналов, бегущих по нервам, как по проводам. Именно эти сигналы являются той азбукой мозга, с помощью которой органы чувств посылают в центральную нервную систему сведения о событиях во

внешнем мире. Нервными импульсами зашифровывает мозг свои приказы мышцам и различным внутренним органам. Наконец, на языке этих сигналов говорят между собой отдельные нервные клетки и нервные центры.

Нервные клетки — основной элемент мозга — разнообразны по величине, по форме, но в принципе обладают единым строением. Каждая нервная клетка состоит из трех частей: из тела, длинного нервного волокна — аксона (длина его у человека от нескольких миллиметров до метра) и нескольких коротких ветвистых отростков — дендритов. Нервные клетки изолированы друг от друга оболочками. Но все



Лауреаты Нобелевской премии 1963 года (слева направо):  
А. ХОДЖКИН, Э. ХАКСЛИ, Д. ЭККЛС.

же клетки взаимодействуют между собой. Происходит это в месте стыка клеток; этот стык называется «синапс». В синапсе встречаются аксон одной нервной клетки и тело или дендрит другой клетки. Причем интересно, что возбуждение может передаваться только в одном направлении: от аксона к телу или дендриту, но ни в коем случае не обратно. Синапс — это как бы кенотрон: он пропускает сигналы только в одном направлении.

В проблеме изучения механизма нервного импульса и его распространения можно выделить два основных вопроса: природа проведения нервного импульса или возбуждения в пределах одной клетки — по волокну и механизм передачи нервного импульса от клетки к клетке — через синапсы.

Какова природа сигналов, передающихся от клетки к клетке по нервным волокнам?

Этой проблемой человек интересовался уже давно. Декарт предполагал, что распространение сигнала связано с переливанием жидкости по нервам, как по трубкам. Ньютон думал, что это чисто механический процесс. Когда появилась электромагнитная теория, ученые решили, что нерв-

ный импульс аналогичен движению тока по проводнику со скоростью, близкой к скорости распространения электромагнитных колебаний. Наконец, с развитием биохимии появилась точка зрения, что движение нервного импульса — это распространение вдоль по нервному волокну особой биохимической реакции.

И все же ни одно из этих представлений не оправдалось.

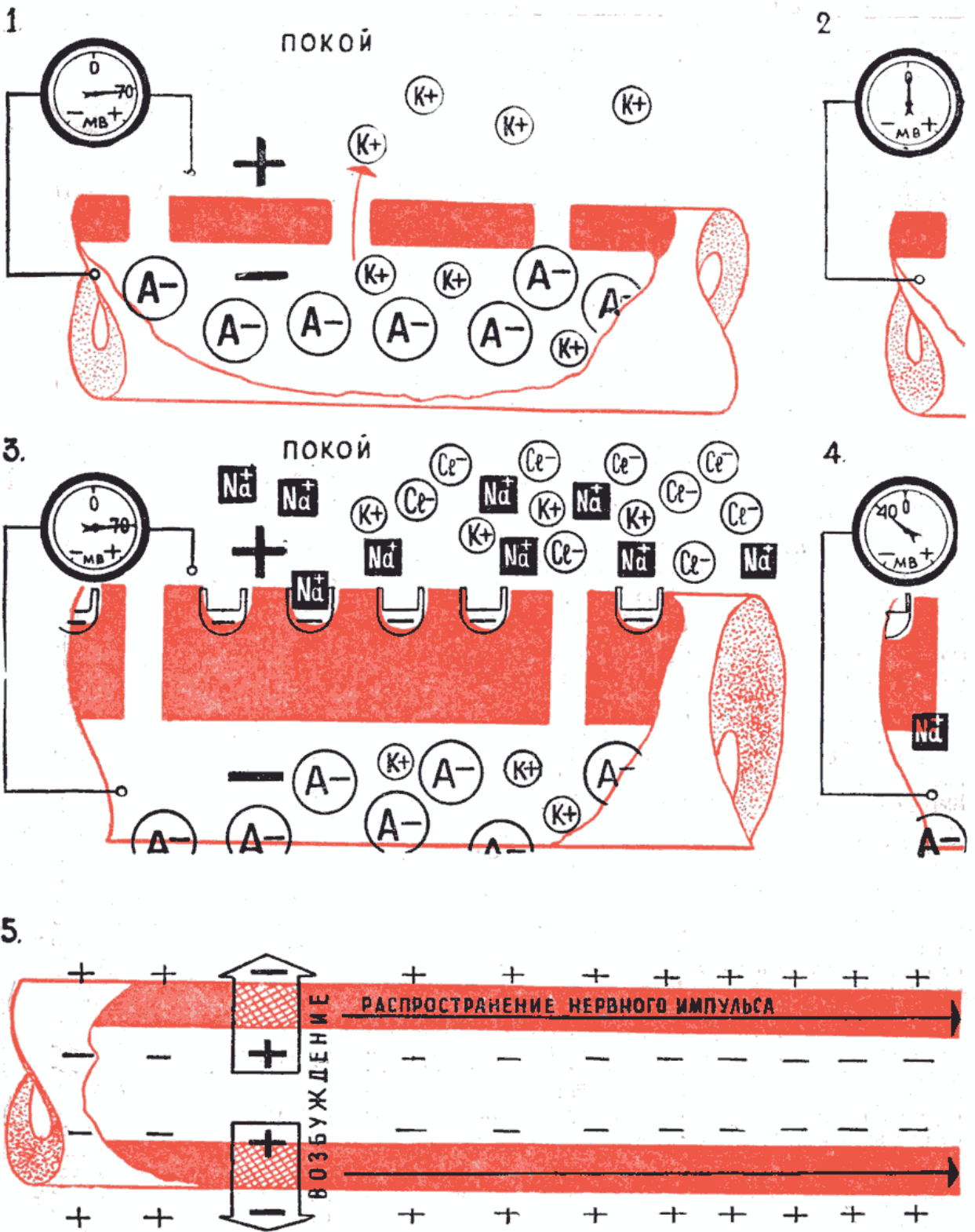
В настоящее время природа нервного импульса раскрыта: это удивительно тонкий электрохимический процесс, в основе которого лежит перемещение ионов через оболочку клетки.

Большой вклад в раскрытие этой природы внесли работы трех ученых: Алана Ходжкина, профессора биофизики Кембриджского университета; Эндью Хаксли, профессора физиологии Лондонского университета, и Джона Экклса, профессора физиологии австралийского университета в Канберре. Им присуждена Нобелевская премия в области медицины за 1963 год.

Впервые предположение об электрохимической природе нервного импульса высказал известный немецкий физиолог Бернштейн в начале нашего столетия.

К началу двадцатого века было довольно много известно о нервном возбуждении. Ученые уже знали, что нервное волокно можно возбудить электрическим током, причем возбуждение всегда возникает под катодом — под минусом. Было известно, что возбужденная область нерва заряжается отрицательно по отношению к невозбужденному участку. Было установлено, что нервный импульс в каждой точке длится всего 0,001—0,002 секунды, что величина возбуждения не зависит от силы раздражения, как громкость звонка в нашей квартире не зависит от того, как сильно мы нажимаем на кнопку. Наконец, ученые установили, что носителями электрического тока в живых тканях являются ионы; причем внутри клетки основной электролит — соли калия, а в тканевой жидкости — соли натрия. Внутри большинства клеток концентрация ионов калия в 30—50 раз больше, чем в крови и в межклеточной жидкости, омывающей клетки.

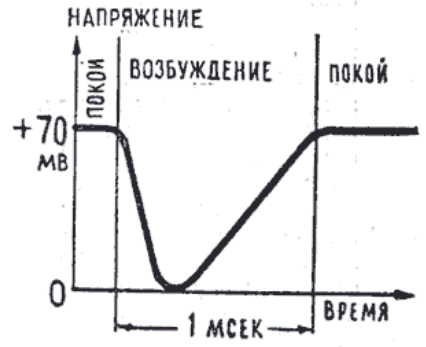
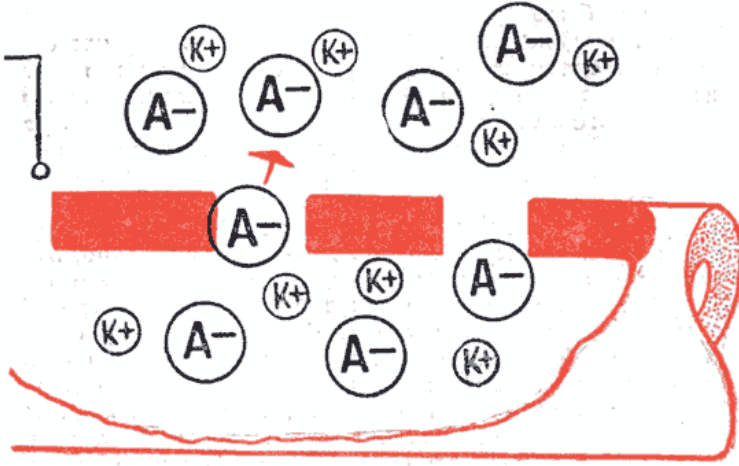
И вот на основании всех этих данных Бернштейн предположил, что оболочка нервных и мышечных клеток представляет собой особую полупроницаемую мембрану. Она проницаема



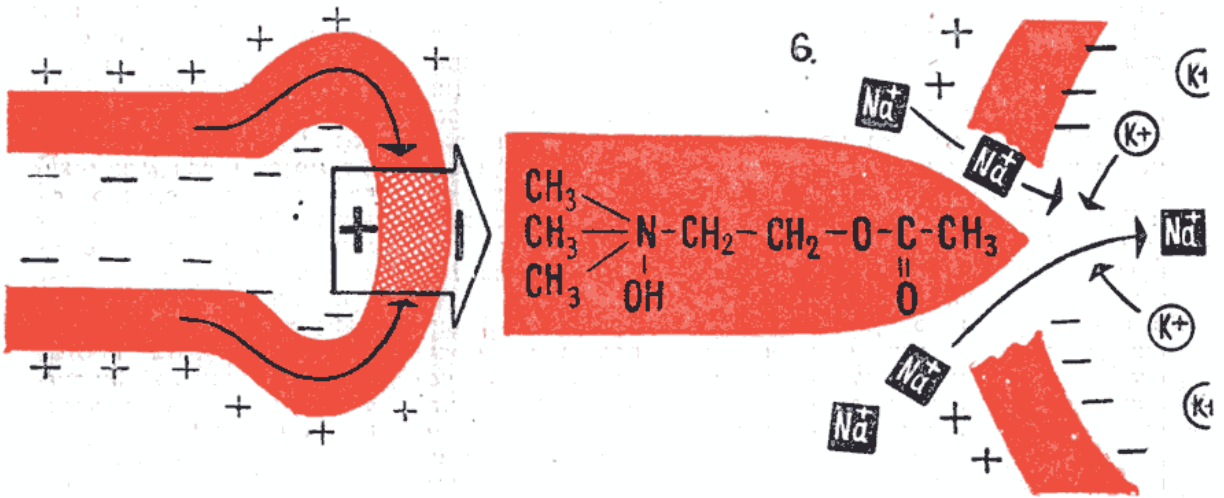
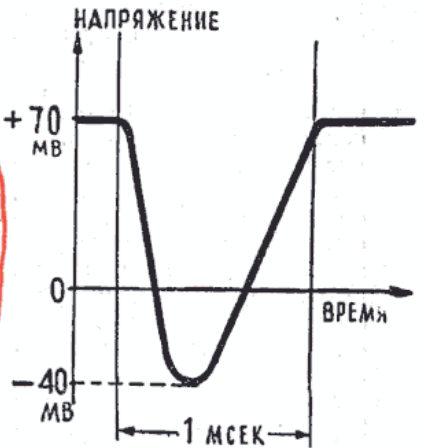
Представления ученых о механизме передачи нервного импульса претерпели в последнее время существенное изменение. До недавнего времени в науке господствовали взгляды Бернштейна. По его мнению, в состоянии покоя (1) нервное волокно заряжено положительно снаружи и отрицательно внутри. Это объяснялось тем, что сквозь поры в стенке волокна могут проходить только положительно заряженные ионы калия ( $K^+$ ); большие по размерам отрицательно заряженные анионы ( $A^-$ ) вынуждены оставаться внутри и создают избыток отрицательных зарядов. Возбуждение (2) по Бернштейну сводится к исчезновению разности потенциалов, которое вызывается тем, что размер пор увеличивается, анионы выходят наружу и выравнивают ионный баланс: количество положительных ионов становится равным количеству отрицательных.

Работа лауреатов Нобелевской премии 1963 года А. Ходжкина, Э. Хаксли и Д. Экклса изменила наши прежние представления. Доказано, что в нервном возбуждении

### ВОЗБУЖДЕНИЕ



### ВОЗБУЖДЕНИЕ



участвуют также положительные ионы натрия ( $\text{Na}^+$ ), отрицательные ионы хлора ( $\text{Cl}^-$ ) и отрицательно заряженные молекулы-переносчики. Покоящееся состояние (3) образуется в принципе так же, как и считалось раньше: избыток положительных ионов — снаружи нервного волокна, избыток отрицательных — внутри. Однако установлено, что при возбуждении (4) происходит не выравнивание зарядов, а перезарядка: снаружи образуется избыток отрицательных ионов, а внутри — избыток положительных. Объясняется это тем, что при возбуждении молекулы-переносчики начинают перевозить сквозь стенку положительные ионы натрия.

Таким образом, нервный импульс (5) — это перемещающаяся вдоль волокна перезарядка двойного электрического слоя. А от клетки к клетке возбуждение передается своеобразным химическим «тараном» (6) — молекулой ацетилхолина, которая помогает ионам прорываться сквозь стенку соседнего нервного волокна.

только для ионов  $K^+$ ; для всех остальных ионов, в том числе и для находящихся внутри клетки отрицательно заряженных анионов, путь закрыт. Ясно, что калий по законам диффузии будет стремиться выйти из клетки, в клетке возникает избыток анионов, и по обе стороны мембраны появится разность потенциалов: снаружи — плюс (избыток катионов), внутри — минус (избыток анионов). Эта разность потенциалов получила название потенциала покоя. Таким образом, в покое, в невозбужденном состоянии внутренняя часть клетки всегда заряжена отрицательно по сравнению с наружным раствором.

Бернштейн предположил, что в момент возбуждения нервного волокна происходят структурные изменения поверхностной мембраны, ее поры как бы увеличиваются, и она становится проницаемой для всех ионов. При этом, естественно, разность потенциалов исчезает. Это и вызывает нервный сигнал.

Мембранная теория Бернштейна быстро завоевала признание и просуществовала свыше 40 лет, вплоть до середины нашего столетия.

Но уже в конце 30-х годов теория Бернштейна встретила с непреодолимыми противоречиями. Сильный удар ей был нанесен в 1939 году тонкими экспериментами Ходжкина и Хаксли. Эти ученые впервые измерили абсолютные величины мембранного потенциала нервного волокна в покое и при возбуждении. Оказалось, что при возбуждении мембранный потенциал не просто уменьшался до нуля, а переходил через ноль на несколько десятков милливольт. То есть внутренняя часть волокна из отрицательной становилась положительной.

Но мало ниспровергнуть теорию, надо заменить ее другой: наука не терпит вакуума. И Ходжкин, Хаксли, Катц в 1949—1953 годах предлагают новую теорию. Она получает название натриевого.

Здесь читатель вправе удивиться: до сих пор о

натрия не было речи. В этом все и дело. Ученые установили с помощью меченых атомов, что в передаче нервного импульса замешаны не только ионы калия и анионы, но и ионы натрия и хлора.

В организме достаточно ионов натрия и хлора, все знают, что кровь соленая на вкус. Причем натрия в межклеточной жидкости в 5—10 раз больше, чем внутри нервного волокна.

Что же это может означать? Ученые предположили, что при возбуждении в первый момент резко увеличивается проницаемость мембраны только для натрия. Проницаемость становится в десятки раз больше, чем для ионов калия. А так как натрия снаружи в 5—10 раз больше, чем внутри, то он будет стремиться войти в нервное волокно. И тогда внутренняя часть волокна станет положительной.

А через какое-то время — после возбуждения — равновесие восстанавливается: мембрана начинает пропускать и ионы калия. И они выходят наружу. Тем самым они компенсируют тот положительный заряд, который был внесен внутрь волокна ионами натрия.

Совсем нелегко было прийти к таким представлениям. И вот почему: диаметр иона натрия в растворе раза в полтора больше диаметра ионов калия и хлора. И совершенно непонятно, каким образом больший по размеру ион проходит там, где не может пройти меньший.

Нужно было решительно изменить взгляд на механизм перехода ионов через мембраны. Ясно, что только рассуждениями о порах в мембране здесь не обойтись. И тогда была высказана идея, что ионы могут пересекать мембрану совершенно другим способом, с помощью тайных до пор до времени союзников — особых органических молекул-переносчиков, спрятанных в самой мембране. С помощью такой молекулы ионы могут пересекать мембрану в любом месте, а не только через поры. Причем эти

молекулы-такси хорошо различают своих пассажиров, они не путают ионы натрия с ионами калия.

Тогда общая картина распространения нервного импульса будет иметь следующий вид. В покое молекулы-переносчики, заряженные отрицательно, мембранным потенциалом прижаты к наружной границе мембраны. Поэтому проницаемость для натрия очень мала: в 10—20 раз меньше, чем для ионов калия. Калий может пересекать мембрану через поры. При приближении волны возбуждения уменьшается давление электрического поля на молекулы-переносчики; они сбрасывают свои электростатические «оковы» и начинают переносить ионы натрия внутрь клетки. Это еще больше уменьшает мембранный потенциал. Идет как бы цепной процесс перезарядки мембраны. И этот процесс непрерывно распространяется вдоль нервного волокна.

Интересно, что нервные волокна тратят на свою основную работу — проведение нервных импульсов — всего около 15 минут в сутки. Однако готовы к этому волокна в любую секунду: все элементы нервного волокна работают без перерыва — 24 часа в сутки. Нервные волокна в этом смысле подобны самолетам-перехватчикам, у которых непрерывно работают моторы для мгновенного вылета, однако сам вылет может состояться лишь раз в несколько месяцев.

Мы познакомились сейчас с первой половиной таинственного акта прохождения нервного импульса — вдоль одного волокна. А как же передается возбуждение от клетки к клетке, через места стыков — синапсы. Этот вопрос был исследован в блестящих опытах третьего нобелевского лауреата, Джона Экклса.

Возбуждение не может непосредственно перейти с нервных окончаний одной клетки на тело или дендриты другой клетки. Практически весь ток вытекает через синаптическую щель в наружную жидкость, и в

Читатель Е. Якушенко (г. Ленинград) в своем письме задает вопрос: «Какова природа запаха? Что это такое?»

## ЗАПАХ ВЕЩЕСТВ, ПО-ВИДИМОМУ, ЗАВИСИТ ОТ ФОРМЫ ИХ МОЛЕКУЛ

Джон ЭМУР, Джеймс ДЖОНСТОН, Мартин РУБИН.

Роза — это роза, а скунс — это скунс, и нос легко определит разницу между ними. Но описать или объяснить эту разницу не так легко. Мы до удивления мало знаем о чувстве обоняния, хотя оно играет важную роль в нашей повседневной жизни. Описать какой-нибудь запах можно, только сравнив его с другим, знакомым нам запахом. У нас нет меры, которой можно было бы измерить силу запаха так, как мы измеряем силу звука (в децибеллах) или света (в люменах). Мы не располагаем удовлетворительной общей теорией, которая объяснила бы, как нос и мозг обнаруживают, сравнивают и опознают запахи. Более 30 теорий было выдвинуто представителями различных наук. Однако ни одна из них не

выдержала экспериментальной проверки, призванной подтвердить право этих теорий на существование.

Химику кажется баснословной, почти невероятной способностью органов обоняния сортировать и характеризовать различные пахнущие вещества. Сложные химические соединения, на анализ которых химик в лаборатории затратил бы не один месяц, нос опознает мгновенно, даже если они находятся в таких малых количествах (до одной десятиллионной доли грамма), что самые чувствительные современные приборы не могут их обнаружить.

Две тысячи лет назад поэт Лукреций предложил простое объяснение чувству обоняния. Он считал, что в «небе» носа есть

соседнюю клетку через синапс попадает ничтожная его доля, неспособная вызвать возбуждение. Таким образом, в области синапсов электрическая непрерывность в распространении нервного импульса нарушается. Здесь, на стыке двух клеток, в силу вступает совершенно другой механизм.

Когда возбуждение подходит к окончанию клетки, к месту синапса, в межклеточную жидкость выделяются физиологически активные вещества — медиаторы, или посредники. Они становятся связующим звеном в передаче информации от клетки к клетке. Медиатор химически взаимодействует со второй нервной клеткой, изменя-

ет ионную проницаемость ее мембраны — как бы пробивает брешь, в которую устремляются многие ионы, в том числе и ионы натрия.

Итак, благодаря работам Ходжкина, Хаксли и Экклса важнейшие состояния нервной клетки — возбуждение и торможение — можно описать в терминах ионных процессов, в терминах структурно-химических перестроек поверхностных мембран. На основании этих работ уже можно делать предположения о возможных механизмах кратковременной и долговременной памяти, о пластических свойствах нервной ткани. Однако это разговор о механизмах в пределах одной или несколь-

ких клеток. Это лишь азбука мозга. По-видимому, следующий этап, возможно, гораздо более трудный, — вскрытие законов, по которым строится координирующая деятельность тысяч нервных клеток, распознавание языка, на котором говорят между собой нервные центры.

Мы сейчас в познании работы мозга находимся на уровне ребенка, который узнал буквы алфавита, но не умеет связывать их в слова. Однако недалеко время, когда ученые с помощью кода — элементарных биохимических актов, происходящих в нервной клетке, прочтут увлекательнейший диалог между нервными центрами мозга.