

К.Ю. Богданов

Физик в гостях у биолога

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 57
ББК 28
К11

К11 **К.Ю. Богданов**
Физик в гостях у биолога / К.Ю. Богданов – М.: Книга по Требованию, 2021. –
144 с.

ISBN 978-5-458-26042-8

ISBN 978-5-458-26042-8

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ЖИВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

...превращать электрическую
силу в нервную.

М. Фарадей

Взаимоотношения между электромагнитными явлениями и жизнью были предметом жарких споров на протяжении более четырех с лишним веков. И только в нашем столетии с появлением достаточно чувствительных приборов удалось продемонстрировать, что протекание многих процессов в живом организме действительно сопровождается изменением электрического поля. За последние 20–30 лет накопилось множество данных, указывающих на высокую чувствительность живых организмов к электромагнитному полю. При этом наблюдаемые эффекты ни в коей мере нельзя объяснить тепловым действием такого поля.

Известно, например, что общий наркоз (потерю сознания и болевой чувствительности) можно вызвать, пропуская через мозг человека импульсы переменного тока. Этот способ обезболивания во время операций широко применяют сейчас у нас в стране и за рубежом. Направление силовых линий электрического поля Земли служит «компасом» при дальних миграциях атлантического угря. Навигационные способности голубей основаны на восприятии магнитного поля Земли. Рост костей нашего скелета изменяется в электрическом поле, и это используют сейчас для лечения переломов. При желании этот перечень биологических эффектов электромагнитного поля можно было бы продолжать довольно долго, но это не является нашей задачей.

Давным-давно

Пионером исследования роли электрического поля в живом организме явился профессор анатомии из Болонского университета Луиджи Гальвани. Начиная с 1775 г. он стал интересоваться взаимосвязью между «электричеством

и жизнью». В 1786 г. один из помощников профессора, выделяя скальпелем мышцу из лапки лягушки, случайно дотронулся им до нерва, идущего к этой мышце. В это же время на том же столе в лаборатории работала электростатическая машина — генератор статического электричества, и каждый раз, когда машина давала разряд, мышца лягушки сокращалась. Гальвани заключил, что каким-то образом электричество «входит» в нерв и это приводит к сокращению мышцы. Последующие пять лет он посвятил изучению роли различных металлов в их способности вызывать мышечные сокращения. Гальвани пришел к выводу, что если нерв и мышца лежат на одинаковых металлических пластинах, то замыкание пластин проволокой не дает никакого эффекта (рис. 1). Но если пластины изготовлены из разных металлов, их замыкание сопровождается мышечным сокращением.

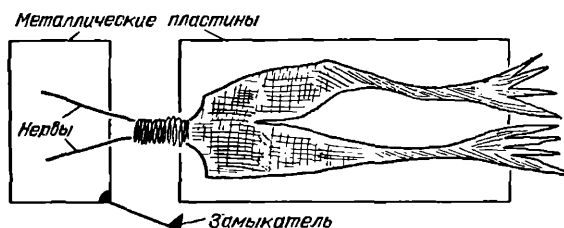


Рис. 1. Схема опыта Л. Гальвани, анализ которого привел А. Вольту к изобретению источника постоянного тока

Гальвани сообщил о своем открытии в 1791 г. Он считал, что причиной подергивания лапки лягушки является «животное электричество», образующееся в самом теле животного, а проволока служит только для замыкания электрической цепи. Одну копию своей работы он послал Алессандро Вольту, профессору физики из Павии (Северная Италия).

Вольта повторил эксперименты Гальвани, получил те же результаты и сначала согласился с его выводом, но потом обратил внимание на то, что «животное электричество» возникает только при наличии в цепи двух различных металлов. Вольта показал, что прикосновение к языку двух разных, соединенных между собой металлов вызывает вкусовое ощущение. Если же прикоснуться к главному яблоку оловянным листком, а в рот взять серебряную ложку, то замыкание ложки и листа даст световое ощущение. Пытаясь опровергнуть тезис Гальвани о существовании «животного электричества», Вольта предположил, что цепь, содержащая два различных металла, контактирующих с солевым раствором, должна быть источником *постоян-*

ного тока — в отличие от электростатической машины, дающей только электрические разряды.

Так оно и оказалось. Свою работу с описанием первого источника постоянного тока (впоследствии названного гальваническим) Вольта опубликовал в 1793 г. Хотя Гальвани вскоре после этого показал, что «животное электричество» существует и в цепях, не содержащих биметаллических контактов, продолжить спор с Вольта он не смог. В 1796 г. Болонья перешла под контроль Франции, и отказавшийся признать новое правительство Гальвани был выдворен из университета. Он вынужден был искать прибежища у своего брата, где уже не занимался наукой вплоть до самой своей смерти (1798 г.). В 1800 г. Вольта представил свое открытие Наполеону, за что получил большое вознаграждение. Так спор двух разных по политическим убеждениям, темпераменту и образованию соотечественников дал толчок развитию современной физики и биологии.

Так кто же был прав в этом споре? Существует «животное электричество» или нет? В последних своих опытах Гальвани использовал сразу две мышцы, расположив их так, что нерв, отходящий от одной мышцы, находился на другой (рис. 2).

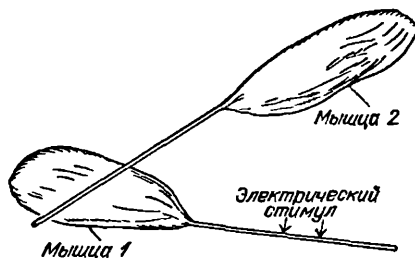


Рис. 2 Схема опыта Л. Гальвани, доказывающего существование «животного электричества»

Оказалось, что при каждом сокращении мышцы 1, вызванном пропусканием тока через ее нерв, сокращается и мышца 2 так, как будто бы через ее нерв тоже пропускают ток. Из этих опытов Гальвани заключил, что мышца во время сокращения служит источником электрического тока. Так было доказано (правда, косвенно) существование «животного электричества». И лишь спустя полвека, в 1843 г., немецкий физиолог Э. Дюбуа-Реймон впервые продемонстрировал наличие электрических полей в нервах, используя для этого усовершенствованную им электроизмерительную аппаратуру.

Что же является источником «животного электричества»? Для ответа на этот вопрос понадобилось еще полвека.

Мембрана

Все живое очень разборчиво относится к компонентам окружающей среды. Помогает этому избирательная проницаемость мембран клеток живого организма. Мембрана клетки — это ее «кожа», имеющая толщину около 0,01 мкм. Клеточная мембрана избирательно снижает скорость передвижения молекул в клетку и из нее. Она определяет, каким молекулам можно проникнуть в клетку, а каким нужно оставаться за ее пределами. Эта деятельность мембраны сопряжена с большими затратами энергии и приводит к тому, что концентрации некоторых ионов внутри и вне клетки могут различаться в десятки, а иногда и тысячи раз (см. табл. 1). Например,

Таблица 1

Концентрация некоторых ионов внутри и снаружи нервного волокна кальмара

Ион	Концентрация, ммоль/л	
	внутри	снаружи
Na ⁺	50	460
K ⁺	340	10,4
Cl ⁻	114	590
Ca ²⁺	0,4	10
Mg ²⁺	10	54
Органические анионы	~ 300	—

концентрация ионов калия внутри клетки почти в 30 раз выше, чем во внеклеточной жидкости. Наоборот, концентрация ионов натрия внутри клетки приблизительно в 10 раз меньше, чем снаружи. Как мы увидим, различия в концентрациях ионов калия и натрия по обе стороны мембраны необходимы для существования электрических полей в живых организмах.

Оказалось, что в состоянии покоя клеточная мембрана проницаема практически только для ионов калия. При возбуждении*) на очень короткое время (около 10^{-3} с у нервных клеток) мембрана становится проницаемой также для некоторых других ионов (нервные клетки и клетки скелетных мышц начинают пропускать внутрь себя ионы натрия; клетки сердца — ионы натрия и кальция; некоторые типы мышечных клеток — только ионы кальция). Такое поведение мембраны объясняется существованием в ней огромного числа (от 10 до 500 штук на 10^{-6} мм²) «пор» или «каналов» нескольких видов, предназначенных для пропускания различных ионов. Лучше всего изучены кана-

*) Смысл этого слова будет расшифрован несколько позже.

лы для ионов натрия и калия. Различная проницаемость мембраны для этих ионов связана с их способностью по-разному притягивать к себе молекулы воды: один ион натрия притягивает пять молекул воды, а калия — только три. Поэтому диаметр иона калия вместе с «шубой» из молекул воды оказывается меньше соответствующего диаметра натрия. Площадь поперечного сечения ионного канала в мембране близка к $1,5 \cdot 10^{-13} \text{ мм}^2$.

Потенциал покоя

Попробуем представить себе, к чему может привести различие в концентрациях ионов калия по обе стороны клеточной мембраны при ее высокой проницаемости для этих ионов. (Именно эта задача была поставлена и решена в 1902 г. немецким физиологом Юлиусом Бернштейном, основателем мембранной теории возбуждения.) Предположим, что мы опустили клетку с мембраной, проницаемой только для ионов калия, в электролит, где их концентрация меньше, чем внутри клетки. Сразу после соприкосновения мембраны с раствором ионы калия начнут выходить из клетки наружу, как выходит газ из надутого шара. Но каждый ион несет с собой положительный электрический заряд, и чем больше ионов калия покинет клетку, тем более электроотрицательным станет ее содержимое. Поэтому на каждый ион калия, выходящий из клетки, будет действовать электрическая сила, препятствующая его движению наружу. В конце концов установится равновесие, при котором электрическая сила, действующая на ион калия в канале мембраны, будет равна силе, обусловленной различием концентраций ионов калия внутри и вне клетки. Очевидно, что в результате такого равновесия между внутренним и наружным растворами появится разность потенциалов. При этом, если за нуль потенциала принять потенциал внешнего раствора, то потенциал внутри клетки будет отрицательным.

Эта разность потенциалов — самое простое из наблюдаемых биоэлектрических явлений — носит название «потенциал покоя» клетки. Можно показать, что выражение для величины потенциала покоя клетки имеет вид

$$E_n = \frac{RT}{eA} \ln \frac{[K^+]_i}{[K^+]_o}, \quad (1)$$

где e — заряд электрона, A — постоянная Авогадро, R — газовая постоянная, T — температура по шкале Кельвина, а $[K^+]_i$ и $[K^+]_o$ — концентрации ионов калия внутри и вне клетки соответственно. Подставляя в выражение (1) $[K^+]_i/[K^+]_o = 30$ и

$T = 300 \text{ K}$, получаем $E_n = 86 \text{ мВ}$, что близко к экспериментально найденным значениям E_n .

Следует отметить, что падение напряжения на клеточной мембране, составляющее менее $0,1 \text{ В}$, происходит на отрезке длиной около 10^{-6} см . Поэтому напряженность электрического поля в толще мембраны может достигать огромных значений — около 10^5 В/см , которые близки к напряженности электрического пробоя этой мембраны: $(2 \div 4) \cdot 10^5 \text{ В/см}$.

Измерить разность электрических потенциалов у живых клеток не так просто — ведь клетки очень малы. Поскольку обычные щупы, прилагаемые к каждому вольтметру, здесь не годятся, то используют стеклянные пипетки (микроэлектроды), диаметр тонкой части (кончика) которых составляет менее одного микрометра. Пипетку заполняют сильным раствором электролита (например, трехмолярным хлористым калием) и соединяют ее содержимое при помощи металлического проводника со входом вольтметра, обладающим высоким (более 10^9 Ом) сопротивлением, так как сопротивление пипетки может иногда приближаться к 10^8 Ом . Необходимы большие ухищрения, чтобы ввести микроэлектрод в клетку, не повредив ее (рис. 3).

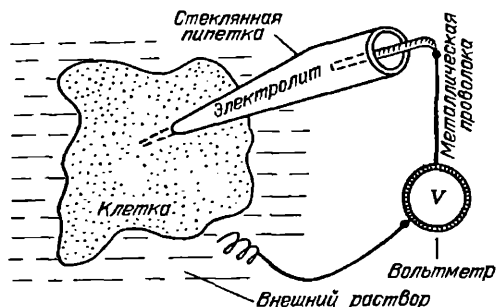


Рис. 3. Измерение разности потенциалов на мембране живой клетки

Напряженность электрического поля клетки в состоянии покоя отлична от нуля только в толще ее мембраны (между ее внутренней и внешней поверхностями). Поэтому в состоянии покоя разность потенциалов между любыми двумя точками внеклеточной среды или любыми двумя точками внутриклеточной среды равна нулю.

Очевидно, что биологическая мембрана, окруженная с обеих сторон растворами электролитов, может служить источником электродвижущей силы (э. д. с.). Однако в отличие от выпускаемых промышленностью элементов постоянного тока био-

логический источник э. д. с. может иметь очень малые размеры, так как толщина мембраны составляет всего 0,01–0,02 мкм. Поэтому в настоящее время ведется разработка источников э. д. с., аналогичных биологической мембране, которые могут найти применение в будущих миникомпьютерах.

Потенциал действия

Что же такое возбуждение мембраны? Это резкое увеличение проницаемости натриевых и/или кальциевых каналов мембраны, сопровождающееся таким же резким изменением разности потенциалов между ее внутренней и наружной поверхностями. Процессы возбуждения в различных клетках отличаются друг от друга только своей скоростью и типом используемых ионов. Лучше всего изучено возбуждение нервной клетки, основную роль в котором играют ионы натрия. Натриевый канал мембраны нервной клетки устроен гораздо сложнее калиевого, и его пропускная способность резко возрастает при увеличении потенциала U внутриклеточной среды, отсчитываемого от потенциала внешнего раствора, принятого за нуль (рис. 4).

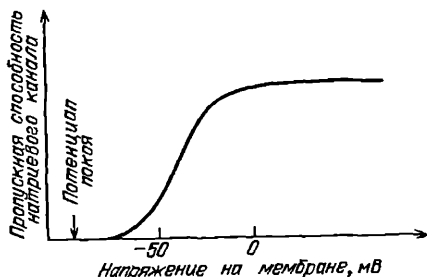


Рис. 4. Зависимость пропускной способности натриевого канала от напряжения на мембране

Предположим теперь, что нам каким-то образом удастся увеличить U на 20–30 мВ (например, пропустив ток через клетку). Как только это произойдет, пропускная способность натриевого канала возрастет и в клетку войдет некоторое число ионов натрия, так как снаружи их концентрация выше, чем внутри. Но каждый ион натрия несет положительный заряд, и это повлечет за собой еще большее увеличение U , а значит, и еще большее повышение пропускной способности натриевого канала, и так далее. Видно, что небольшое первоначальное увеличение должно приводить к быстрому, взрывоподобному про-

цессу, в результате которого проницаемость мембраны для ионов натрия возрастает до максимально возможных значений и становится в десятки раз выше ее проницаемости для ионов калия. Это обусловлено тем, что количество натриевых каналов в мембране приблизительно в 10 раз превышает число калиевых. Поэтому, пренебрегая проницаемостью мембраны для калия, можно вычислить потенциал U в конце этого быстрого процесса, используя выражение (1), заменив в нем $[K^+]$ на $[Na^+]$ и приняв $[Na^+]_i/[Na^+]_o = 0,1$. После подстановки получим, что скачок потенциала за время этого переходного процесса составит около 0,14 В.

Но натриевый канал обладает еще одной особенностью, отличающей его от калиевого: пропускная способность натриевого канала зависит не только от напряжения на мембране, но и от того, сколько времени прошло после его открытия. Натриевый канал может находиться в открытом состоянии лишь в течение 0,1–1,0 мс в зависимости от температуры и от вида клетки (рис. 5). А это приводит к тому, что разность потенциа-

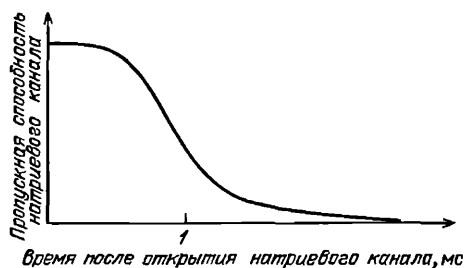


Рис. 5. Зависимость пропускной способности натриевого канала от времени, прошедшего после его открытия

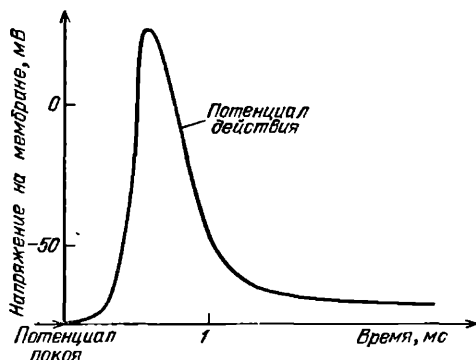


Рис. 6. Изменение напряжения на мембране во время нервного импульса

лов на мембране после резкого скачка в 0,1 В снова возвращается к своему исходному значению – потенциалу покоя. Более быстрому возвращению U к потенциалу покоя способствует также то, что одновременно с уменьшением проницаемости натриевого канала начинает расти проницаемость калиевых каналов мембраны. Описанный процесс лавинообразного увеличения U и его последующего уменьшения получил название «потенциал действия», или «нервный импульс» (рис. 6).

Нервный импульс составляет материальную основу упомянутого ранее процесса возбуждения в нервной системе. За исследование природы нервного импульса английским ученым А. Ходжкину и А. Хаксли в 1963 г. была присуждена Нобелевская премия.

Распространение нервного импульса

Как наши органы чувств сообщают мозгу о том, что происходит вокруг нас? И вообще, как обмениваются информацией различные части нашего организма? Природа придумала для этого две специальные системы связи. Первая, гуморальная (от латинского *humor* – влага, жидкость) система основана на диффузии или же переносе с током жидкости биологически активных веществ из места, где они синтезируются, по всему организму. Эта система является единственной у простейших организмов, а также у растений.

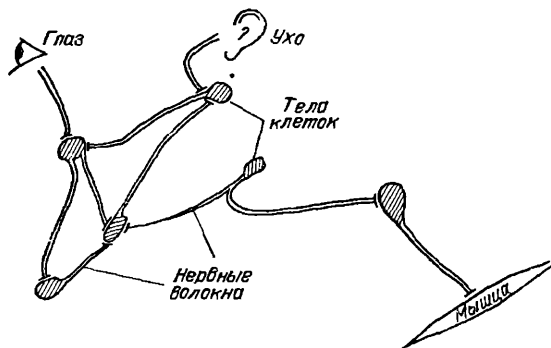


Рис. 7. Схема связей между нервными клетками, органами чувств и мышцами

У многоклеточных животных (и у нас с вами), кроме первой есть еще и вторая, нервная (от латинского *nervus* – жила) система, состоящая из огромного числа нервных клеток с отростками – нервными волокнами, пронизывающими весь организм (рис. 7). Мембрана тела нервной клетки возбуждается, как толь-

ко к нему приходят нервные импульсы от соседних клеток по их отросткам. Это возбуждение распространяется на нервное волокно, отходящее от клетки, и движется по нему со скоростью до сотни метров в секунду к соседним клеткам, мышцам или органам. Таким образом, элементарным сигналом, передающим информацию из одной части тела животного в другую, является нервный импульс. В отличие от точек и тире азбуки Морзе длительность нервного импульса постоянна (около 1 мс), а передаваемая информация может быть самым причудливым образом закодирована в последовательности этих импульсов.

Немало известных ученых в прошлом пытались объяснить механизм распространения возбуждения по нерву. Исаак Ньютон на страницах своей знаменитой «Оптики», изданной в 1704 г., выдвинул предположение, что нерв обладает свойствами оптического световода. Поэтому «вибрации эфира, возникающие в мозгу усилием воли, могли бы распространяться оттуда по твердым, прозрачным и однородным капиллярам нервов в мышцы, заставляя их сокращаться или расслабляться». Основоположник русской науки, первый русский академик М. В. Ломоносов считал, что распространение возбуждения по нерву происходит благодаря передвижению внутри него особой «весьма тонкой нервной жидкости». Интересно, что скорость распространения возбуждения по нерву была впервые измерена известным немецким физиком, математиком и физиологом Германом Гельмгольцем в 1850 г., год спустя после того, как И. Физо измерил скорость света.

Почему же нервный импульс может распространяться? От каких характеристик нервного волокна зависит скорость распространения по нему импульса?

Для того чтобы ответить на эти вопросы, рассмотрим электрические свойства нервного волокна. Оно представляет собой цилиндр, боковую поверхность которого образует мембрана, отделяющая внутренний раствор электролита от наружного. Это придает волокну свойства коаксиального кабеля, изоляцией которого служит клеточная мембрана. Но нервное волокно — очень плохой кабель. Сопротивление изоляции этого живого кабеля примерно в 10^5 раз меньше, чем у обычного кабеля, так как в первом случае ее толщина составляет 10^{-6} см, а во втором — около 10^{-1} см. Кроме того, внутренняя жила живого кабеля — это раствор электролита, удельное сопротивление которого в миллионы раз больше сопротивления металла. Поэтому невозбужденное нервное волокно плохо приспособлено для передачи электрических сигналов на большие расстояния.