

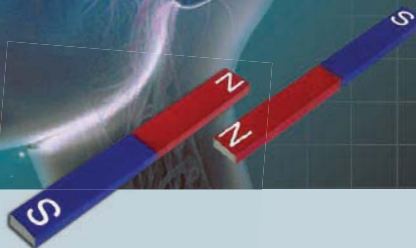
ВЫПУСК

133
Библиотечка КВАНТ



К.Ю. Богданов

ФИЗИК В ГОСТЯХ у биолога



УДК 577.35
ББК 28.071
Б73

Серия «Библиотечка «Квант»
основана в 1980 году

Редакционная коллегия:

Б.М.Болотовский, А.А.Варламов, Г.С.Голицын, Ю.В.Гуляев,
М.И.Каганов, С.С.Кротов, С.П.Новиков, В.В.Произволов, Н.Х.Розов,
А.Л.Стасенко, В.Г.Сурдин, В.М.Тихомиров, А.Р.Хохлов,
А.И.Черноуцан

Богданов К.Ю.

Б73 **Физик в гостях у биолога.** – 2-е издание. – М.: Издательство
МЦНМО, 2015. – 240 с. (Библиотечка «Квант». Вып. 133.
Приложение к журналу «Квант» №1/2015.)

ISBN 978-5-4439-0625-6

В книге рассказывается о физических процессах, лежащих в основе жизнедеятельности организма. Читатель познакомится с современными представлениями о работе органов чувств человека и животных; с физическими принципами, определяющими способность человека видеть слышать, дышать и т.п.; с основами мембранной теории происхождения биоэлектрических явлений. Узнает о применении физики не только в биологии, но и в социологии, технологии и даже нанотехнологии.

Книга адресована, прежде всего, школьникам и учителям физики и биологии. Но она, несомненно, будет интересна и самому широкому кругу читателей.

ISBN 978-5-4439-0625-6



9 785443 906256 >

12+

ББК 28.071

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Глава 1. Живое электричество	5
Глава 2. Биологическая оптика	34
Глава 3. Прочнее гранита	56
Глава 4. Механика сердечного пульса	67
Глава 5. Дышите глубже: вы взволнованы!	91
Глава 6. Алло! Вы меня слышите?	111
Глава 7. От моськи до слона	127
Глава 8. Чуть-чуть физики для настоящего охотника	141
Глава 9. Вода внутри нас	152
Глава 10. Физика автомобильных пробок	166
Глава 11. Кинетика социального неравенства	175
Глава 12. Динамика паникующей толпы	190
Глава 13. Вверх и вниз через атмосферу	203
Глава 14. Космический нанолифт	213
Глава 15. Что может электростатика	216
Глава 16. Хищник и жертва: уравнения сосуществования	225

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 изменениями 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 года он стал интересоваться взаимосвязью между «электричеством и жизнью». В 1786 году 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.

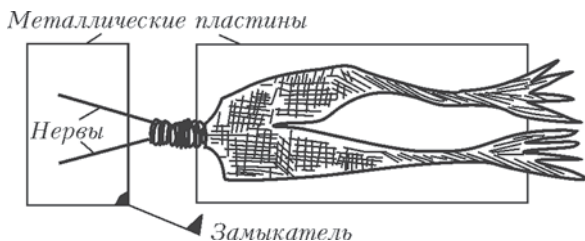


Рис. 1. Схема опыта Л.Гальвани, анализ которого привел А.Вольта к изобретению источника постоянного тока

Гальвани сообщил о своем открытии в 1791 году. 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 Вольта, 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 соевым раствором, должна быть источником *постоянного 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 году. 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 году 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 году 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). 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 году, 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

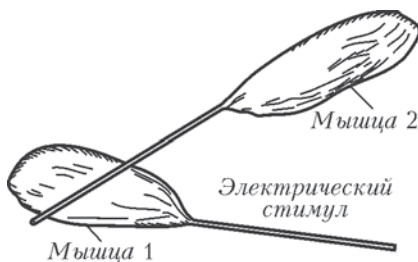


Рис. 2. Схема опыта Л.Гальвани, доказывающего существование «животного электричества»

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 в тысячи раз (табл.1). Например, концентрация ионов калия внутри клетки почти в 30 раз выше, чем во внеклеточной

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	—

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 (смысл этого слова будет расшифрован несколько позже) 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 каналы 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 году 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 ноль 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

$$E_{\text{п}} = \frac{RT}{eN_{\text{А}}} \ln \frac{[\text{K}^+]_i}{[\text{K}^+]_o}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, $N_{\text{А}}$ – постоянная Авогадро, R – универсальная газовая постоянная, T – температура по шкале Кельвина, а $[\text{K}^+]_i$ и $[\text{K}^+]_o$ – концентрации ионов калия внутри и вне клетки соответственно. Подставляя в выражение (1) $[\text{K}^+]_i/[\text{K}^+]_o = 30$ и $T = 300 \text{ К}$, получаем $E_{\text{п}} = 86 \text{ мВ}$, что близко к экспериментально найденным значениям $E_{\text{п}}$.

Следует отметить, что падение напряжения на клеточной мембране, составляющее менее 0,1 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 $(2 - 4) \cdot 10^5$ 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).

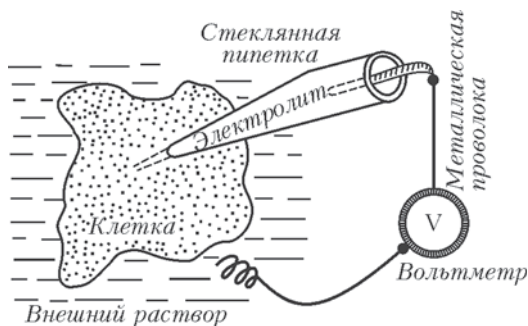


Рис. 3. Измерение разности потенциалов на мембране живой клетки

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 – ЭДС. Однако в отличие от выпускаемых промышленностью элементов постоянного тока биологический источник ЭДС может иметь очень малые размеры, так как

толщина мембраны составляет всего 0,01–0,02 мкм. Поэтому в настоящее время ведется разработка источников ЭДС, 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 ноль (рис.4).

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 процессу, 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

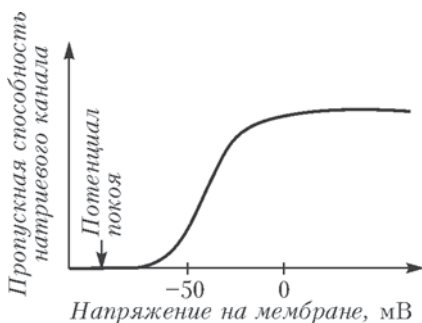


Рис. 4. Зависимость пропускной способности натриевого канала от напряжения на мембране

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

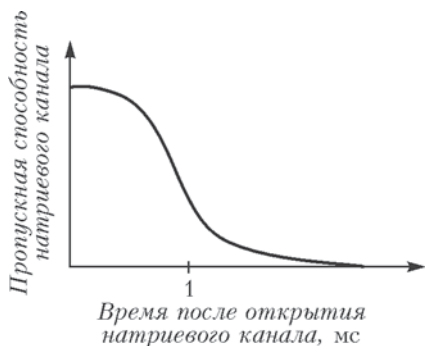


Рис. 5. Зависимость пропускной способности натриевого канала от времени, прошедшего после его открытия

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 потенциалов 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).



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

Нервный импульс составляет материальную основу упомянутого ранее процесса возбуждения в нервной системе. За исследование природы нервного импульса английским ученым А.Ходжкину и Э.Хаксли и австралийскому ученому Д.Экклсу в 1963 году 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.

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

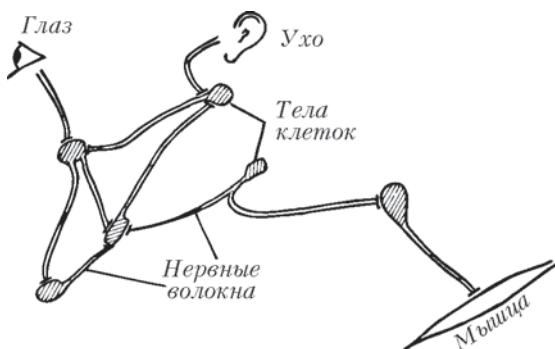


Рис. 7. Схема связей между нервными клетками, органами чувств и мышцами

только 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 году, выдвинул предположение, что нерв обладает свойствами оптического световода. Поэтому «вибрации эфира, возникающие в мозгу усилием воли, могли бы распространяться отсюда 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 Г.Гельмгольцем в 1850 году, год спустя после того, как А.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 –

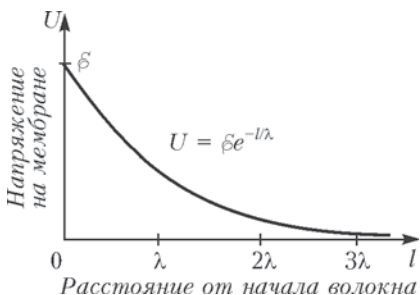


Рис. 8. Зависимость напряжения на мембране нервного волокна от расстояния от источника тока, положительный полюс которого находится внутри волокна, а отрицательный – снаружи, вблизи точки $l = 0$

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.

Можно показать, что напряжение на мембране такого волокна будет экспоненциально уменьшаться по мере удаления от источника напряжения (рис.8). Величина λ , вхо-

дящая в показатель экспоненты и определяющая степень затухания электрического сигнала в нервном волокне, называется постоянной длины волокна. Значение постоянной длины зависит от диаметра волокна d , сопротивления единицы площади его мембраны r_m и удельного сопротивления жидкости внутри волокна r_i . Эта зависимость имеет вид

$$\lambda = \sqrt{\frac{dr_m}{4r_i}}. \quad (2)$$

В выражение (2) не входит удельное сопротивление среды, окружающей волокно, так как в большинстве случаев размеры окружающей проводящей жидкости во много раз превышают диаметр волокна и внешний раствор можно считать эквипотенциальным.

Используя уравнение (2), можно найти значения λ для хорошо изученных нервных волокон краба или кальмара, имеющих $d \approx 0,1$ мм, $r_m \approx 1000$ Ом·см² и $r_i \approx 100$ Ом·см. Подстановка этих значений дает $\lambda \approx 0,2$ см. Это означает, что на расстоянии 0,2 см от тела клетки амплитуда нервного импульса должна уменьшиться почти в 3 раза, хотя длина нервных волокон у этих животных может достигать нескольких сантиметров.

Но на самом деле этого не происходит, и нервный импульс без уменьшения амплитуды распространяется по всему волокну. И вот почему. Раньше мы показали, что увеличение на 20–30 мВ потенциала внутриклеточного раствора по отношению к наружному приводит к дальнейшему его росту и возникновению нервного импульса в данной области клетки. Из наших расчетов вытекает, что если в начале волокна возникает нервный импульс с амплитудой 0,1 В, то на расстоянии λ напряжение на мембране еще будет оставаться больше 30 мВ, так что и здесь возникает нервный импульс; затем то же самое происходит в следующем участке волокна и так далее. Поэтому распространение импульса по нервному волокну можно сравнить с распространением пламени по бикфордову шнуру, но следует отметить, что в первом случае необходимую энергию доставляет разность концентраций ионов калия и натрия по обе стороны мембраны, а во втором – сгорание легко воспламеняющейся изоляции шнура.

Очевидно, что, чем больше значение постоянной длины λ , тем скорее сможет распространяться нервный импульс. Так как значения r_m и r_i почти одни и те же у различных клеток и животных, то получается, что λ , а следовательно, и скорость распространения импульса должны зависеть в основном от

диаметра волокна, увеличиваясь пропорционально квадратному корню из его величины. Этот наш вывод полностью согласуется с результатами экспериментов. Гигантское (диаметром около 0,5 мм) нервное волокно кальмара может служить примером того, как Природа воспользовалась зависимостью скорости распространения нервного импульса от диаметра волокна. Известно, что кальмар при бегстве от опасности использует свой «реактивный двигатель», выталкивая из мантийной полости большую массу воды. Сокращение мускулатуры, приводящей в движение этот механизм, запускается нервными импульсами, распространяющимися по нескольким таким гигантским волокнам, в результате чего достигается большая скорость реакции и одновременность срабатывания всей этой мускулатуры.

Однако использовать такие гигантские волокна во всех областях нервной системы, где требуется быстрота реакции и анализа поступающей информации, невозможно, так как они заняли бы слишком много места. Поэтому для более развитых животных Природа избрала совсем другой путь увеличения скорости распространения возбуждения.

Перехваты Ранвье

На рисунке 9 схематически показано нервное волокно (разрез вдоль оси), наиболее типичное для нашей нервной системы. Это волокно по всей своей длине разделено на

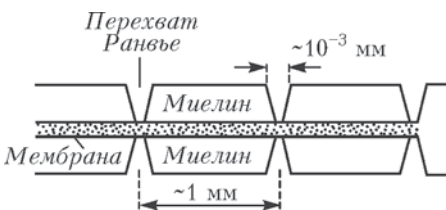


Рис. 9. Миелинизированное нервное волокно. Показан разрез волокна вдоль оси. Точками изображено внутреннее содержимое волокна, ограниченное возбудимой мембраной

сегменты длиной около 1 мм каждый, на протяжении которых волокно со всех сторон покрыто миелином – жироподобным материалом, обладающим хорошими изоляционными свойствами. Между сегментами на участке длиной около 1 мкм мембрана этого волокна имеет непосредственный контакт с внешне-

ним раствором. Эта область, где исчезает миелиновая оболочка, носит название «перехват Ранвье».

К чему должна приводить такая структура нервного волокна? Как следует из формулы (2) для постоянной длины волокна λ , при увеличении сопротивления единицы площади мембраны

(r_m) величина λ тоже должна возрасти, а вместе с ней – и скорость распространения импульса. Это позволяет увеличить последнюю почти в 25 раз по сравнению с немиелинизированным волокном того же диаметра. Кроме того, затраты энергии на распространение возбуждения по миелинизированному волокну гораздо меньше, чем по обычному, так как общее количество ионов, пересекающих мембрану, в первом случае пренебрежимо мало. Таким образом, миелинизированное волокно представляет собой высокоскоростной и экономичный канал связи в нервной системе.

А что снаружи?

Мы установили причины возникновения разности потенциалов на мембране живых клеток и рассмотрели процесс распространения импульса по нервному волокну. Все электрические явления, о которых идет речь, протекают только на мембране клеток. Но что же тогда регистрировал Э.Дюбуа-Реймон в 1843 году с помощью простейшего гальванометра, присоединив его к нерву? Так как микроэлектроды стали использовать лишь сто лет спустя, это значит, что его гальванометр регистрировал электрическое поле в окружающем нерв растворе.

Рассматривая кабельные свойства волокна, мы для простоты считали наружный раствор электролита эквипотенциальным. Действительно, падение напряжения в наружном растворе должно быть в сотни раз меньше падения напряжения внутри волокна из-за гораздо больших размеров внешнего проводника (раствора). Тем не менее, при достаточном усилении электрическое поле можно всегда обнаружить вокруг возбужденной клетки или органа, особенно тогда, когда все клетки данного органа возбуждаются одновременно. Таким органом, в котором все клетки возбуждаются почти одновременно, является наше сердце. Как и все остальные внутренние органы, оно окружено со всех сторон электропроводящей средой (удельное сопротивление крови порядка $100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Поэтому при каждом возбуждении сердце окружает себя электрическим полем. С проявлением этого пульсирующего во времени электрического поля мы сталкиваемся, когда приходим в поликлинику в электрокардиографический кабинет, где измеряют разности потенциалов между различными точками поверхности нашего тела, возникающие при сокращениях сердца (электрокардиограмма).

Живые молнии

Первыми известными человеку проявлениями «животного электричества» были разряды электрических рыб. Электрического сома изображали еще на древнеегипетских гробницах, а «электротерапию» с помощью этих рыб рекомендовал Гален (около 130–200), проходивший врачебную практику на гладиаторских боях в Древнем Риме.

Интересный рецепт электролечения с помощью электрического ската был написан врачом римского императора Клавдия в I веке. Дословно он звучит так: «Головная боль, даже если она хроническая и непереносимая, исчезает, если живого черного ската поместить на болезненную точку и держать его там до тех пор, пока боль не прекратится». Аналогичный рецепт существовал и для лечения подагры: «При любом типе подагры, когда начинаются боли, живого черного ската следует положить под ноги. При этом пациент должен стоять на влажном песке, омываемом морской водой, находясь в таком состоянии до тех пор, пока вся его нога ниже колена не онемевает». В те же времена было замечено, что удар ската может проходить через железные копыя или палки, смоченные морской водой, и поражать таким образом людей, непосредственно не соприкасающихся с ним.

Как известно, некоторые рыбы способны производить очень сильные электрические разряды, обездвиживая (парализуя) других рыб и даже животных размером с человека. Древние греки, верившие, что электрический скат может «зачаровывать» как рыб, так и рыбаков, называли его «нарке», что означает в переводе с греческого – приводящая в оцепенение, поражающая рыба. Слово «наркотик» имеет то же происхождение.

До появления электрической теории наибольшим успехом пользовалась теория, объяснявшая удар ската как механическое воздействие. Среди сторонников этой теории был французский естествоиспытатель Р. Реомюр, именем которого названа одна из температурных шкал. Реомюр полагал, что орган ската, с помощью которого он производит удар, представляет собой мышцу, способную сокращаться с высокой частотой. Поэтому прикосновение к такой мышце может вызывать временное онемение конечности так, как это, например, бывает после резкого удара по локтю.

Только в конце XVIII века были поставлены опыты, показавшие электрическую природу удара, наносимого скатом. Немаловажную роль в этом сыграла и лейденская банка – основная электрическая емкость того времени. Те, кому довелось испытать на себе разряды лейденской банки и ската, утверждали, что по

своему действию на человека они очень сходны между собой. Так же, как и разряд лейденской банки, удар ската может одновременно поражать нескольких людей, держащих друг друга за руки, один из которых касается ската.

Последние сомнения относительно природы удара ската исчезли в 1776 году, когда удалось продемонстрировать, что при определенных условиях этот удар может вызвать электрическую искру. С этой целью в сосуд, где плавала рыба, частично погружали две металлические проволоки, оставляя воздушный зазор между ними как можно меньше. Кратковременное замыкание проволок привлекало внимание рыбы, и она, подплывая к проволокам, подвергала их электрическому удару, одновременно с которым между проволоками иногда проскакивали искры. Чтобы лучше видеть искру, опыты ставили ночью. Вскоре после этих опытов в некоторых лондонских газетах появилась реклама, в которой всего за 2 шиллинга и 6 пенсов вам предлагали устроить встряску, пропустив через вас разряд электрической рыбы. Горячим сторонником использования электролечения был один из основоположников теории электричества Б. Франклин. Поэтому в медицине использование статического электричества до сих пор называют «франклинизацией».

К началу XIX века было уже известно, что разряд электрических рыб проходит через металлы, но не проходит через стекло и воздух. Следует отметить, что в XVIII–XIX веках электрические рыбы часто использовались учеными-физиками как источники электрического тока. Например, М. Фарадей, изучая разряды электрического ската, показал, что «животное электричество» по сути ничем не отличается от других видов электричества, которых в его время насчитывалось пять: статическое (получаемое трением), термическое, магнитное, химическое и животное. Фарадей считал, что если бы удалось понять природу «животного электричества», то можно было бы «превращать электрическую силу в нервную».

Самые сильные разряды производит южноамериканский электрический угорь. Они достигают 500–600 В. Импульсы электрического ската могут иметь напряжение до 50 В и разрядный ток более 10 А, так что их мощность часто превышает 0,5 кВт. Все рыбы, дающие электрические разряды, используют для этого специальные электрические органы. У «высоковольтных» электрических рыб, таких как морской электрический скат и пресноводные электрический угорь и сом, эти органы могут занимать значительную часть объема тела животного. Напри-

мер, у электрического угря они идут почти вдоль всей длины тела, составляя около 40% всего объема рыбы.

Схема электрического органа представлена на рисунке 10. Он состоит из *электроцитов* – сильно уплощенных клеток, упакованных

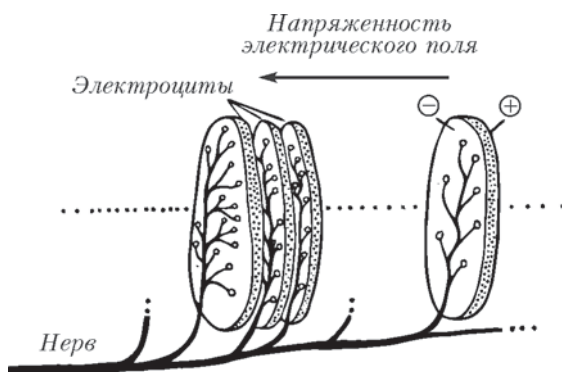


Рис. 10. Схема электрического органа рыбы

ванных в столбики. К мембране одной из двух плоских сторон электроцита подходят окончания нервных волокон (иннервированная мембрана), а на другой стороне их нет (неиннервированная мембрана). Электроциты собраны в столбик так, что они обращены друг к другу разноименными мембранами. В состоянии покоя разность потенциалов на обеих мембранах электроцита одинакова и близка к -80 мВ (внутренняя среда клетки заряжена отрицательно по отношению к наружной). Поэтому между внешними поверхностями обеих мембран электроцита разность потенциалов отсутствует.

Когда к электроциту по нерву приходит импульс (такие импульсы приходят практически одновременно ко всем электроцитам органа), то из нервных окончаний выделяется ацетилхолин, который, воздействуя на иннервированную мембрану электроцита, увеличивает ее проницаемость для ионов натрия и некоторых других ионов, что приводит к возбуждению этой мембраны. При возбуждении напряжение на иннервированной мембране электроцита меняет знак и достигает ~ 70 мВ, а разность потенциалов между внешними поверхностями одного и того же электроцита становится ~ 150 мВ. Поскольку электроциты собраны в столбик, напряжение между крайними клетками в столбике будет пропорционально их числу.

В электрическом органе электрического угря количество электроцитов в одном столбике может достигать 5–10 тысяч, что

и объясняет большое напряжение разряда этих рыб. Значение разрядного тока определяется количеством таких столбиков в электрическом органе. У электрического ската на каждом плавнике находится 45 таких столбиков, у электрического угря – около 70 на каждой стороне тела. Для того чтобы ток, генерируемый электрическим органом, не проходил через саму рыбу, орган окружен изолирующей тканью с высоким удельным сопротивлением и контактирует только с внешней средой.

Однако среди электрических рыб есть и такие, которые используют свой электрический орган не для нападения или защиты, а для поиска жертвы. Это акулы, миноги и некоторые сомообразные, обладающие очень высокой чувствительностью к внешнему электрическому полю. Известно, что свободно плавающая акула обладает способностью находить скрытую в песке камбалу, основываясь исключительно на восприятии биоэлектрических потенциалов, возникающих при дыхательных движениях добычи.

Электрический орган у рыб, обладающих высокой чувствительностью к внешнему электрическому полю, работает с частотой несколько сотен герц и может создавать на поверхности тела животного колебания разности потенциалов в несколько вольт. Это приводит к возникновению электрического поля, которое улавливается специальными органами так называемой боковой линии – электрорецепторами (рис.11). Электрорецепторы этих рыб обладают удивительной чувствительностью к напряженности электрического поля и посылают нервные импульсы в мозг животного, когда значение напряженности превышает 10 мкВ/м . Так как находящиеся в воде вокруг рыбы предметы отличаются по своей электропроводности от воды, они искажают электрическое поле. По этим искажениям поля рыбы могут ориентироваться в мутной воде и находить добычу.

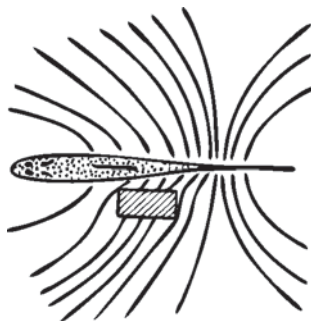


Рис. 11. Распределение эквипотенциальных линий электрического поля вокруг рыбы, обладающей электрическим органом. Заштрихованный предмет имеет электропроводность меньше, чем окружающая среда. Видно, что напряженность электрического поля вблизи боковой поверхности рыбы со стороны предмета отличается от таковой с противоположной стороны