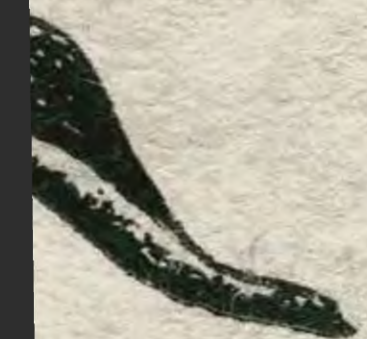




С. ГЛАВНАКТИМОНОВ
В. М. КУРНИ

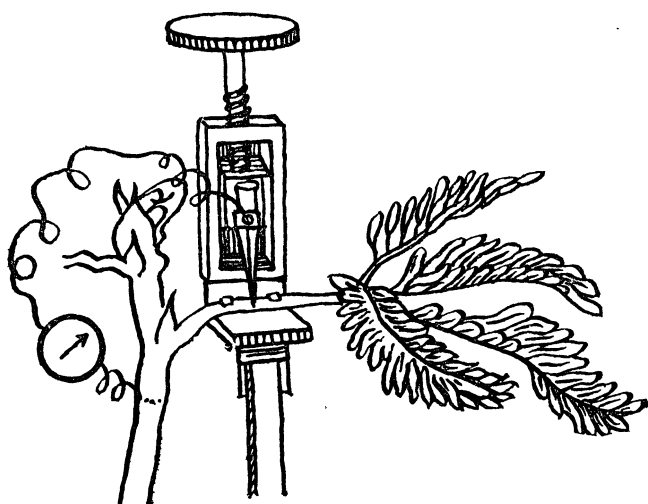
БОТАНИКИ С ГЛАВБАВАНИОМЕТРОМ

587
N 15



С. Г. ГАЛАКТИОНОВ
В. М. ЮРИН

БОТАНИКИ С ГАЛЬВАНОМЕТРОМ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1979

28.5
Г15

Галактионов С. Г., Юрин В. М.
Г15 Ботаники с гальванометром. М., «Знание», 1979.
144 с.

Играют ли электрические явления в растениях какую-либо физиологическую роль или это просто побочное следствие неравномерного распределения концентраций ионов? Можно ли с помощью измерения электрических эффектов получить полезную информацию о каких-то процессах жизнедеятельности? Каким образом электрические характеристики растительных клеток и тканей зависят от внешних условий?

В популярной форме авторы отвечают на эти вопросы.
Книга рассчитана на широкий круг читателей.

Г $\frac{2004000000-013}{073(02)-79}$ 8—79

28.5
58

В этой книге пойдет речь о явлениях сравнительно малоизвестных, малоизученных и нередко на первый взгляд странных — так же как может показаться странным и само название книги. Ботанику, как считают многие, пристало иметь дело с копалкой и гербарной папкой, а не с гальванометром.

«Я полагаю, я буду недалеко от истины, сказав, что при слове *ботаник* еще и теперь в воображении многих людей, даже вполне образованных, но стоящих в стороне от науки, возникает один из следующих двух образов: или скучный педант, обладающий неистощимым запасом двойных латинских названий, часто самых варварских, умеющий, почти не глядя, всякое растение, всякую травку назвать по имени и по отчеству, умеющий, пожалуй, при случае сказать, какая трава употребляется от золотухи, какая от водобоязни, на что в действительности ни та, ни другая не годна. Вот один тип, наводящий тоску и уныние и, конечно, неспособный возбудить сочувствие к науке. Но рядом с ним при слове *ботаник* возникает и другой, менее мрачный образ: страстный любитель цветов, какой-то мотылек, порхающий от цветка к цветку, услаждающий свои взоры их ярким колером, вдыхающий их ароматы, воспевающий гордую розу и скромную фиалку, одним словом, тип изящного адепта той *amabilis scientiae**, как в былое время любили величать ботанику. Вот два крайних типа, связанные во мнении многих, очень многих людей с представлением о ботанике; говорю это на основании личного опыта. Или педант-номенклатор,

* Приятная наука.

или любитель-садовод, или аптекарь, или эстетик, но никак не ученый. Ученый как-то заслоняется этими двумя типами».

Эти слова принадлежат великому русскому ботанику К. А. Тимирязеву и были написаны сто лет назад.

Многое, конечно, изменилось с тех пор в представлениях о ботанике и ботаниках. Бесспорно, читатели знают, что исследования жизненных процессов, происходящих в растении, ведутся в наши дни самыми современными средствами, и использование электрической аппаратуры в таких исследованиях не редкость. До отказа нашпигованные электроникой приборы применяются для измерения транспирации, содержания хлорофилла в листьях, интенсивности фотосинтеза и даже поверхности листа, т. е. в традиционных ботанических экспериментах.

Но мы хотим рассказать не об этих методах и не о приборах, используемых в них. Речь пойдет об электрических явлениях, возникающих в организме самого растения в процессе жизнедеятельности.

Незачем говорить, что в этом случае приходится иметь дело с токами и напряжениями чрезвычайно слабыми, регистрация которых дело далеко не простое. Многие ботаники, занимающиеся подобного рода работами, имеют дипломы физиков и электроников, являются кандидатами или докторами физико-математических наук...

Еще совсем недавно ботаника объединяла в себе все науки о растении, а такие направления, как физиология, систематика, анатомия, позднее биохимия и даже биофизика растений, рассматривались как ее разделы. Затем каждое из перечисленных направлений стало предъявлять все большие права на самостоятельность, а ботаниками продолжали называть себя лишь представители традиционных отраслей — систематики, экологии и т. п.

Конечно, существует разобщенность между ботаниками, работающими в различных отраслях своей науки, но вряд ли это оправдывает претензии части «растительных» физиологов или биофизиков на полную автономию, так же как и требования «правоверных» ботаников об отлучении этих направлений от матери-ботаники. В конце концов два физика, один из которых занимается элементарными частицами, а другой — механикой сплошных сред, также с трудом понимают друг друга, но оба называют себя физиками.

Итак в этой книге речь пойдет о так называемом

«растительном электричестве». Разумеется, многое из того, о чем мы рассказываем, встречалось на страницах научно-популярных изданий, и нередко авторами этих материалов были выдающиеся мастера-популяризаторы. Читатель без сомнения найдет в нашей книге достаточно знакомых фактов или идей, используемых, однако, в совершенно иной связи,— для объяснения или иллюстрации различных электрических явлений в растительном организме. В подобных случаях мы по возможности избегали избитых примеров.

Многие наблюдения и гипотезы, имеющие отношение к теме нашего повествования, датируются концом прошлого или началом этого века. При этом мы старались обращаться к источникам, малоизвестным широкому кругу читателей (исключение составляют знаменитые тимирязевские лекции «Жизнь растения»).

Конечно, независимо от доли так называемого «исторического» материала, в каждом из разделов мы стремились к современному освещению основных фактов и идей.

Физические механизмы, лежащие в основе того или иного явления, объясняются в форме простых рассуждений, без каких-либо расчетов или формул.

Мы сознательно уклоняемся от обсуждения результатов, не вполне точно установленных или, скажем деликатно, чересчур смелых, а если уж и упоминаем о них, то с соответствующими оговорками.

Глава I. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО В РАСТЕНИЯХ

Всем известно, как любят популяризаторы подчеркивать роль случая в истории великих открытий. Поплыл Колумб осваивать западный морской путь в Индию и, представьте, совершенно случайно... Сидит себе Ньютон в саду, и вдруг случайно падает яблоко...

Законы жанра неумолимы, и коль взялся популяризатор писать на какую бы то ни было научную тему, будь добр найти тот самый случай, с которого все началось, — ибо в каждом деле он должен быть.

История открытия электричества в живых организмах не является исключением. Во многих работах подчеркивается, что открыто оно было совершенно случайно. В сентябре 1786 г. профессор анатомии Болонского университета Луиджи Гальвани прикоснулся отпрепарированной мышцей лягушки к холодным перилам балкона, обнаружил, что она при этом сокращается и заподозрил, что в ней возникает электрический ток. В других книгах, другие авторы описывают совершенно иные обстоятельства, при которых Гальвани открыл животное электричество.

Историки и популяризаторы науки редко ограничиваются одним вариантом исторической случайности, и само сопоставление различных версий могло бы быть темой отдельного изыскания, изобилующего забавными подробностями. Однако нам, жителям второй половины двадцатого века, очень уж просто похлопывать по плечу ученых и мыслителей 1700-х годов — мы знаем, что было потом.

«Но, чтобы быть справедливыми, — как писал Стефан Цвейг, — представим себе уровень физических знаний в

ту эпоху... Скромно и робко заявляет о себе электричество, этот джин, тогда еще запертый в ничтожной лейденской банке. Ибо, что считается в 1775 году электрическим явлением? Вольт еще не произвел своего решающего наблюдения; только от маленьких, игрушечных батарей можно получить несколько ни на что не нужных голубых искр и слабый удар в кончик пальца. Это, должно быть, уже в то время смутное предчувствие настойчиво подсказывало человеческой душе, что в грядущем одна из таких сил, — может быть, сжатый пар, может быть, электрическая или магнитная батарея — изменит облик мира и обеспечит двуногим млекопитающим на миллионы лет господство над землей, — предчувствие тех, раньше еще не учтенных масс энергии, усмиренной рукою человека, которые наводняют наши города светом, бороздят небо и передают звук от экватора к полюсу в бесконечно малую долю секунды».

Мысли о существовании электрических явлений в живых организмах высказывались и до Гальвани, но это были именно предчувствия. Серьезные ученые предпочитали говорить о них в предположительной форме: «Не проходит ли нервный флюид в нервах с достаточной скоростью, чтобы нагреть их и пустить в ход электричество волокон? Не может ли быть, что под влиянием этого электричества нервные волокна сморщиваются и сокращают целиком мышцу, не изменяя ее объема? Нельзя ли объяснить некоторые моральные антипатии и отвращения, которые вызывают некоторые пищевые продукты и запахи, сотрясениями, которые электрическая атмосфера этих тел может вызвать в нервных волокнах?» (де Сованс).

Последняя фраза для современного читателя звучит, конечно, странно. Но по сравнению с нагромождениями нелепостей и откровенным шарлатанством, свойственным большинству современных де Совансу трактатов о животном электричестве, содержащееся в ней предположение кажется вполне рациональным.

Впервые гипотезу о том, что действующее в первое начало есть электричество, высказал в 1743 г. Гаузен. «Остроумную догадку Гаузена, — как в свое время отмечал русский академик Ю. Чаговец, — можно с полным правом поставить на одну доску с догадкой, например, Теренция Веррона и Лукреция, которые с такой же уверенностью приписывают распространение заразных болез-

ней мельчайшим существам, носящимся в воздухе, как это сделал 30 лет назад Пастер».

Роль Пастера в этом случае, как отмечалось, сыграл Гальвани, давший первые доказательства электрических процессов в живых тканях. Отметим, что аналогию между двумя великими открытиями можно было бы развить в ином отношении — очень уж сходной оказалась реакция научной общественности. Значительная ее часть приняла сообщение Гальвани с совершенно неумеренным энтузиазмом. «Физиологи думали, — писал впоследствии немецкий электрофизиолог Эмиль Дюбуа-Реймон, — что заветная их мечта о жизненной силе у них в руках. Врачи считали, что после этого ни одной неизлечимой болезни существовать не может, и, по крайней мере, ни один мнимоумерший не будет похоронен заживо».

Как обычно бывает в подобных ситуациях, основную массу энтузиастов составляли непрофессионалы. Немногочисленную же, но грозную армию скептиков возглавил сам Вольта.

Он начал придирчиво изучать влияние различных побочных факторов на результаты опытов Гальвани. Тот не придумал, например, значения тому обстоятельству, что сокращение лапки происходит легче и энергичнее, если половинки дуги, соединяющей нерв с мышцей, составлены из двух различных металлов. Вольта же показал, что соприкасающиеся пластинки из разнородных металлов сами являются источником электричества. Он установил далее, что достаточно незаметной разницы в чистоте металла на конце пластинки, в полировке, форме, температуре и т. д. поверхностей, соприкасающихся с тканью, чтобы характер сокращения изменился. И — как результат — Вольта стал отрицать способность нерва и мышцы генерировать электричество.

Уж чего только не придумывал Гальвани, чтобы добиться однородности проводника! Однако у вольтаистов всегда находилось хоть какое-нибудь возражение — в конце концов абсолютную однородность гарантировать очень трудно. Гальвани и его ученики заняли откровенно оборонительную позицию и без конца совершенствовались, придумывали новые приборы, шлифовали идеи... Так что в конечном счете и физиологии, и физике вышло только на пользу заносчивое упрямство Вольты, хотя его нападки были подчас чересчур эмоциональны и недостаточно тактичны.

«Однако мы должны извинить доблестных бойцов науки,— писал Ю. Чаговец,— если в пылу увлечения они преступали иногда законы беспристрастия и справедливости. Быть может, ничего нет для человека более трудного, как поступиться, хотя бы отчасти, своим образом мыслей и сознать, что его излюбленные убеждения не вполне соответствуют действительности».

Напряжение—0,1 вольта

Начальный период исследования электрических явлений, протекающих в живой ткани, был представлен исключительно работами, выполнявшимися на животных объектах. Первые бесспорные доказательства существования аналогичных процессов и в растительных тканях были получены в середине XIX в. Дюбуа-Реймоном.

После этого в «Записках» Петербургской академии наук появляется обстоятельное исследование Н. Леваковского, в котором идет речь об электрических токах в различных органах мимозы и других растений; затем следует серия работ Раниса, посвященных сопоставлению характера электрических процессов, протекающих в растительной и животной тканях.

Изучению «растительного электричества» (наряду с «животным») в XIX в. было уделено немалое внимание. И как итог, уже в 1901 г. вышла книга Т. Вяземского «Электрические явления растений», специально посвященная этим проблемам.

Может быть, сыграла определенную роль научная мода — в те годы электричество было символом динамичного развития науки вообще. 1901 г.— это начало «века пара и электричества», и ботаники взялись за гальванометры.

Какое же электричество удалось открыть в растениях?

Для начала были повторены основные опыты по открытию электрических процессов у животных — и обнаружилось далеко идущее принципиальное сходство электрических свойств животных и растительных тканей.

Еще со времени Гальвани электрофизиологам были известны так называемые токи повреждения. Если, например, мышечный препарат разрезать поперек волокон и подвести электроды гальванометра к срезу и продольной

неповрежденной поверхности (рис. 1), прибор фиксирует разность электрических потенциалов около 0,1 вольта. По аналогии стали измерять токи повреждения на разных растительных тканях — и с почти неизменным успехом. Срезы листьев, стебля, репродуктивных органов, клубней всегда оказывались заряженными отрицательно по отношению к нормальной ткани.

Рассмотрим в качестве примера несколько нестандартный опыт, поставленный в 1912 г. Бейтнером и Лебом. Объектом этого опыта было яблоко. Вначале Бейтнер и Леб разрезали его пополам и вынули сердцевину. Затем они убедились, что если оба электрода, отведенных к гальванометру, приложить к яблоку с наружной стороны — к кожуре, прибор не фиксирует никакой разности потенциалов. Если же один электрод перенести во внутреннюю часть мякоти — гальванометр отметит появление тока повреждения. При извлечении части мякоти от центра к периферии величина потенциала долгое время не изменяется (рис. 2) и начинает падать лишь после удаления последних слоев мякоти, прилегающих изнутри к кожуре. Когда между электродами остается только кожура, разность потенциалов опять равна нулю.

В отличие от ньютонова яблока яблоко Бейтнера и Леба не оказалось провозвестником новой эры в науке, но основные особенности токов повреждения демонстрировались с его помощью, как видим, довольно наглядно.

Впоследствии выяснилось, что некоторая разность электрических потенциалов существует и между различными анатомическими элементами неповрежденных органов растений. В конце прошлого века Кункель показал, что центральная жилка листьев ряда культурных растений — каштана, табака, тыквы — электроположительна по отношению к зеленой поверхности листа. Многими исследователями отмечались также значительные разности потенциалов между частями цветка.

Для обозначения явлений подобного рода, наблюдавшихся как на целых, так и на поврежденных органах или тканях, использовали термин «токи покоя» — в отличие от обширного класса электрических процессов, возникающих в живых тканях под влиянием различного рода раздражителей и именуемых токами действия.

Токи действия первоначально были открыты также на препаратах животных тканей. Классический способ их демонстрации был найден еще Гальвани. Два нервно-мыш-

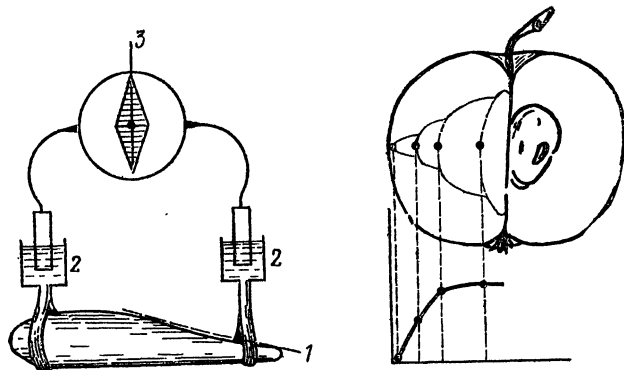


Рис. 1. Схема опыта по измерению токов повреждения на мышце: 1 — плоскость среза; 2 — электроды, 3 — гальванометр.

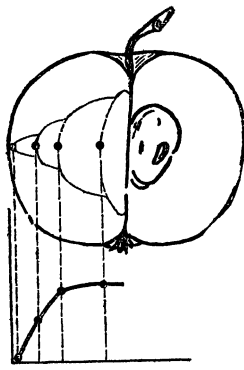


Рис. 2. Опыт Бейтнера и Леба — токи повреждения в яблоке.

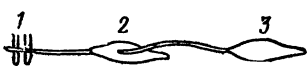


Рис. 3. Опыт Гальвани по обнаружению токов действия: 1 — раздражающие электроды; 2, 3 — нервно-мышечные препараты

печных препарата укладываются таким образом, чтобы на мышечной ткани одного из них лежал нерв другого (рис. 3). Раздражая первую мышцу с помощью каких-либо химических агентов, холода, электричества, мы сможем отчетливо увидеть вызываемые этим раздражением сокращения второй мышцы. Впоследствии Дюбуа-Реймон установил, что под влиянием раздражения наблюдается непродолжительное и обратимое изменение величины тока повреждения, совпадающее во времени с сокращением мышцы.

Не удивительно поэтому, что первые попытки обнаружения токов действия у растений предпринимались именно на тканях, способных к сокращению. Токи действия в растительных тканях были обнаружены в опытах с черешками листьев мимозы, способными совершать механические движения под влиянием внешних раздражителей. Однако наиболее интересные результаты были получены в конце прошлого века Бердон-Сандерсоном, исследовавшим токи действия в закрывающихся листьях насекомоядного растения — так называемой венериной мухоловки. Оказалось, что в момент сворачивания края

листа в его тканях возникают точно такие же токи действия, как в мышце при сокращении!

Постепенно стали накапливаться сведения об электрических явлениях, сопровождающих многие процессы жизнедеятельности растений — фотосинтез, дыхание. Выяснилось, что в момент гибели некоторых растительных тканей их потенциал резко возрастает.

Индийский исследователь Бос соединил внешнюю и внутреннюю части зеленой горошины с гальванометром и затем нагрел ее до 60°C . При этом был зарегистрирован электрический потенциал 0,5 В. Вот комментарий Боса: «Если 500 пар половинок горошин собрать в определенном порядке в серии, то конечное электрическое напряжение составит 500 В, что вполне достаточно для гибели на электрическом стуле не подозревающей об этом жертвы. Хорошо, что повар не знает об опасности, которая ему угрожает, когда он готовит это особенное блюдо, и, к счастью для него, горошины не соединяются в упорядоченные серии».

Наконец, были открыты электрические ритмы растений. Если, например, поместить кончик корня молодого бобового растения в воду и между различными точками корня и наружной средой измерять разность потенциалов, окажется, что эта величина колеблется с периодом 5—20 мин, причем амплитуда колебаний уменьшается по мере удаления от кончика корня (рис. 4), а частота сильно зависит от температуры окружающей среды. Аналогичное явление было отмечено и на сеянцах вьюнка; при этом регистрировалась разность потенциалов между стеблями и почвой. Ритмические колебания потенциала зарегистрированы у очень многих высших растений и у некоторых грибов. Они значительно отличаются по своим временным характеристикам. Принято различать три типа колебаний: ритмические, единичные спайки и генерализованную активность. Их форма понятна из рис. 5. Выяснилось, что колебания подобного рода зависят от степени освещенности растения.

Но раз в растениях вырабатываются какие-то токи, значит и внешний, приложенный ток должен неким образом влиять на жизнедеятельность растений. На первый взгляд может показаться удивительным, как часто в прошлом веке (да и в самом начале нынешнего) весьма серьезные исследователи вновь и вновь повторяли один и тот же опыт: пропускали ток через различные рас-

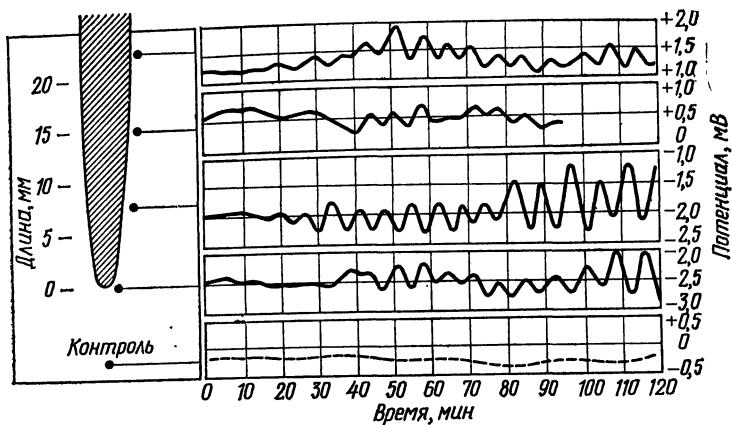


Рис. 4. Электрические ритмы корня бобового растения

Рис. 5. Различные типы электрической активности растительных тканей: 1 — ритмические колебания; 2 — единичные спайки; 3 — генерализованная активность

тительные ткани и описывали условия, при которых они погибали.

Однако и эти результаты содержали в себе некоторую полезную характеристику электрических свойств растений. Причины губительного действия электрических разрядов на живые организмы были к тому времени изучены слабо, а признаки поражения электрическим током казались очень странными и специфическими. Ведь недаром знаменитое франклиновское доказательство тождественности молнии и электрической искры базировалось

на сходстве симптомов поражения молнией и искрой от разряда лейденской банки (в специальных опытах Франклин таким образом умерщвлял кур)...

И потом — не обязательно листья и стебли мучить электрическим током досмерти. При действии же сравнительно умеренных по силе токов в клетках листа, как оказалось, замедляется движение протоплазмы. Увеличивая ток, его можно остановить совсем, не убивая при этом ткани — после снятия напряжения клетки оживают, движение протоплазмы восстанавливается.

Словом, по мере накопления опытного материала становилось все очевиднее, что электрические явления, существующие в растениях, играют какую-то важную роль в процессах жизнедеятельности и заслуживают самого детального исследования. А в понимании любого ботаника (как и любого биолога вообще) первым шагом на пути такой детализации непременно должно быть выяснение вопроса о роли отдельных органов, тканей, клеток, а может быть, и субклеточных структур в возникновении тех или иных потенциалов. В самом деле, все описанные измерения относятся к структурам довольно неоднородным. Например, лист образован тканями нескольких сортов, и микроскопическое его строение достаточно сложно.

Перед нами — поперечный срез листа редьки (рис. 6). В центре его находится главная жилка — светлое утолщение, хорошо заметное при простом рассматривании листа. Снизу и сверху лист покрывают плоские клетки кожицы, собственно мякоть разделяется на два слоя. Клетки ткани, образующие верхний слой, сильно вытянутые; эту ткань называют палисадной. Нижняя ткань — губчатая — образована клетками округлой формы. Помимо этого в самой жилке есть два вида проводящих, трубчатых тканей — типа древесины и типа луба; есть еще ткань, придающая остову листа механическую прочность (с отпугивающим названием склеренхима), есть... Да мало ли какие типы тканей и клеток есть в листе, и все — разные и по своему строению, и по форме, и по характеру выполняемых ими функций.

Так что если опыт показывает разность электрических потенциалов между жилкой и мягкой тканью, мы по-прежнему не можем ничего сказать о том, какие именно ткани или клетки ответственны за ее возникновение, а какие выполняют роль пассивных проводников. И выход, несомненно, один — перенести исследования на клеточный

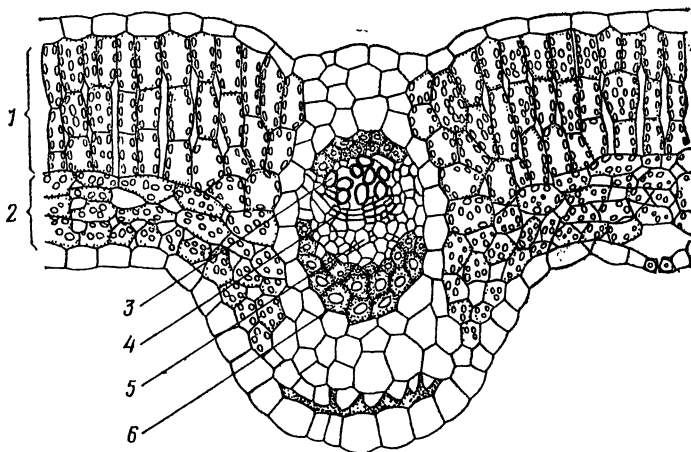


Рис. 6. Поперечный срез листа редьки: 1 — палисадная ткань; 2 — губчатая ткань; 3 — проводящая ткань типа древесины; 4 — камбий; 5 — луб; 6 — склеренхима

уровень, установить, какие же электрические явления происходят в отдельной растительной клетке. Следует отметить, что спасительная во многих случаях постановка экспериментов по аналогии с опытами на животных тканях невозможна: слишком велики структурные различия между типичной животной и типичной растительной клеткой.

Электрический элемент—растительная клетка

Описание растительной клетки, к которому мы собираемся приступить, дело непростое. Различных (причем принципиально различных) типов растительных клеток сотни, может быть, даже тысячи, и дать некий их усредненный портрет можно, лишь смирившись с утратой фотографического реализма. Мы постараемся сохранить лишь те детали, которые существенны для дальнейшего изложения.

Наружным панцирем растительной клетки является целлюлозная оболочка. Это мертвое образование, имеющее, как правило, довольно рыхлую структуру. Молекулы целлюлозы, представляющие собой длинные полимерные цепочки, сворачиваются в пучки по несколько десятков, образуя нитевидные тяжи — мицеллы. Из мицелл, в свою

очередь, складываются волокнистые структуры — фибриллы, из переплетения которых и состоит основа клеточной оболочки. Сравнительно большие свободные промежутки между фибриллами могут частично или полностью заполняться пластическими наполнителями (лигнин, амилопектин, гемицеллюлоза), так что по своей внутренней структуре клеточная оболочка напоминает железобетон (так, по крайней мере, кажется немецкому химику Фрейдбергу) — мицеллярным тяжам отводится роль арматуры, а наполнителю — бетона. Правда, объемные соотношения этих элементов, пожалуй, обратны тем, которые приняты при изготовлении железобетонных конструкций, — целлюлозные фибриллы занимают обычно большую часть общего объема клеточной оболочки. Кроме того, на долю наполнителя чаще всего приходится лишь часть свободного пространства между фибриллами, и внутри оболочки сохраняются поры довольно значительных размеров.

Клеточная оболочка включает в себя протопласт — «живое вещество» клетки. Слизистая субстанция — протоплазма — содержит мелкие и сложно организованные включения, ответственные за важнейшие процессы жизнедеятельности — фотосинтез (хлоропласты), дыхание (митохондрии), деление и размножение (ядро). Обычно слой протоплазмы со всеми этими включениями прилегает к клеточной стенке, а внутри протопласта больший или меньший объем занимает вакуоль — капля водного раствора различных солей и органических веществ. Иногда в клетке несколько вакуолей (рис. 7, а).

Не следует понимать сказанное таким образом, что собственно протоплазма представляет собой вещество гомогенное, не обладающее внутренней структурой. Напротив, внутри нее можно выделить участки разной плотности, подвижные тяжи, напоминающие жгутики яичного белка, а главное — поверхности ее контакта с клеточной оболочкой и вакуолью покрыты тончайшими пленками — мембранами. Мембрана, прилегающая к клеточной стенке, носит название плазмалеммы, вакуоль от протоплазмы отделяется другой мембраной — тонопластом (рис. 7, б). Толщина каждой мембраны — всего лишь несколько молекул, но молекул довольно крупных. В структуре мембраны можно выделить три молекулярных слоя — два наружных, образованных молекулами белков, и внутренний, состоящий из жироподобного вещества — липидов. Тол-

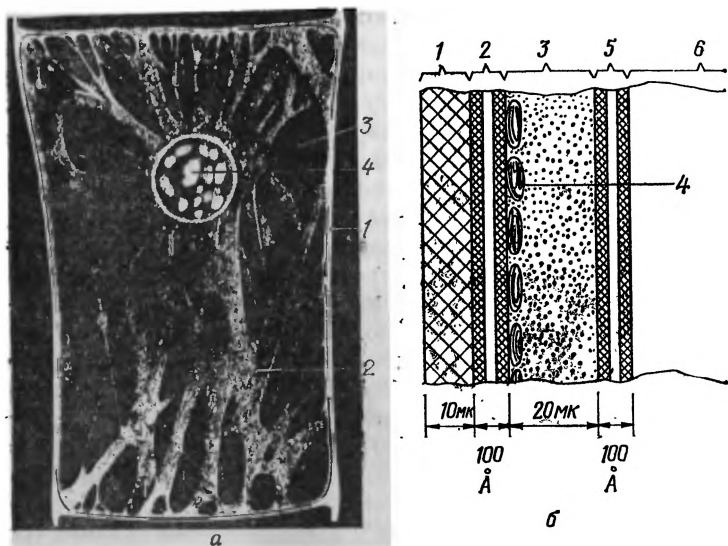


Рис. 7. Строение растительной клетки: *a* — микрофотография клетки волоска дыни; 1 — клеточная оболочка; 2 — цитоплазма; 3 — вакуоль; 4 — ядро; *б* — схематическое изображение фрагмента поперечного среза клетки харовой водоросли: 1 — клеточная стенка; 2 — плазмалемма; 3 — цитоплазма; 4 — хлоропласты; 5 — тонопласт; 6 — вакуоль

щина плазмалеммы, как и тонопласта, составляет всего $75\text{--}100 \text{ \AA}$ (A — символ, принятый для обозначения ангстрема — 10^{-8}см). Эта единица длины употребляется, в частности, в лексиконе исследователей молекулярной структуры; так, длина большинства валентных связей составляет от 1 до 2 \AA).

Довольно трудно наглядно представить себе, сколь тонки плазмалемма и тонопласт; возможно, нашим авторским долгом было бы порассуждать здесь о том, сколько раз следует расщепить человеческий волос, чтобы получить нить такой же толщины, и т. п. Но мы только повторим, что их толщина — всего несколько молекул, а размер даже таких великанов молекулярного мира, как белки, очень мал.

Зато имеет смысл подробнее остановить внимание на их строении, причем в первую очередь нас будет интересовать не дальнейшая детализация молекулярной структуры, а причина их трехслойной, «бутербродной», орга-

низации. Ее принципы легко понять, рассмотрев некоторые свойства мыла. Напомним, что основой мыла являются жирные кислоты — вещества, молекулы которых состоят из длинной углеводородной цепочки, оканчивающейся кислотной группой — карбоксилем (рис. 8,а). Если такую молекулу разрезать по линии, показанной на рисунке, правая ее часть окажется соединением типа парафина, левая — уксусной кислотой. К чему же приводит объединение двух столь непохожих веществ в одну молекулу?

Известно, что парафин не только не растворяется в воде, но и не смачивается ею. Говорят еще об отсутствии его сродства к воде или — совсем профессиональным языком — о его гидрофобности. Наоборот, такие вещества, как масло, керосин, маргарин и т. п., определяемые в быту как «жирные», легко его смачивают или растворяют.

Свойства уксусной кислоты совершенно противоположны — она прекрасно растворяется в воде и упорно не желает иметь ничего общего с жирными веществами. Ясно, что молекула жирной кислоты рассматриваемого типа должна была бы обладать некими компромиссными свойствами — это мы и наблюдаем в действительности. Жирные кислоты, с одной стороны, кое-как растворяются в том же керосине и — хоть и очень плохо — в воде. Если же молекула жирной кислоты оказывается у поверхности соприкосновения воды с чем-то жирным — она стремится расположиться таким образом, чтобы ее парафиновый «хвост» был растворен в жирной среде, а гидрофильная группа — карбоксил — торчал наружу, находясь в воде.

Если выстроенными таким образом карбоксильными группами покрыта значительная часть жирной поверхности, — она становится смачиваемой водой, а обработанные таким образом жирные частицы (рис. 8,б) легко смываются.

Иными словами, — мыло моет. Нас, однако, интересует не столько само объяснение этого довольно известного факта, сколько рассмотрение на его основе еще нескольких любопытных явлений. Ведь мыло может быть использовано не только для мытья чего-то или кого-то, но и для разного рода забав с мыльными пузырями. А стенка мыльного пузыря — объект чрезвычайно любопытный. На всякой поверхности мыльного раствора молекулы жирных кислот стремятся расположиться так, чтобы их гидрофобные части были как бы вытолкнуты из воды наружу.

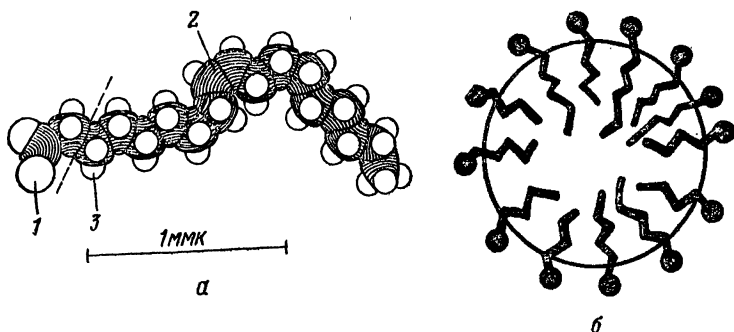


Рис. 8. Строение молекулы жирной кислоты (а) и частица жира, с погруженными в нее неполярными частями молекул жирной кислоты (б); 1 — атомы кислорода; 2 — атомы углерода; 3 — атомы водорода

Образуются тончайшая — толщиной в одну молекулу — поверхностная пленка, причем она очень прочно связывается с водой. В мыльном пузыре таким образом организованы и внутренняя, и наружная поверхности — что придает ему прочность и предохраняет от быстрого высыхания.

Способностью образовывать на водной поверхности мономолекулярные пленки обладают многие вещества, молекулы которых содержат резко разграниченные гидрофильную и гидрофобную части. С некоторыми из них можно проделать следующий занятный опыт. Пластинка из гидрофильного материала, погруженная в воду до образования на ее поверхности мономолекулярной пленки (рис. 9, а), осторожно приподнимается, так, чтобы часть пленки оказалась перенесенной на нее (рис. 9, б), а затем опять погружается. При этом образуется двойная пленка, обе поверхности которой гидрофильны, а гидрофобные части молекул образуют внутренний слой. Такая пленка, естественно, легко смачивается с двух сторон.

К сказанному остается добавить, что белки, выстилающие обе поверхности плазмалеммы и тонопласта, — соединения гидрофильные, а внутренний липидный слой — гидрофобный. Как видим, аналогия с только что описанной искусственной бимолекулярной пленкой несомненна. Благодаря наружным слоям осуществляется хороший контакт мембраны с разделяемыми фазами — всегда по

преимуществу водными, а липидный слой, даже при незначительной толщине, обеспечивает их хорошую взаимную изоляцию.

Пусть читателя не удивляет то обстоятельство, что мы так подробно остановились на строении и свойствах плазмалеммы и тонопласта — ибо как раз эти образования и играют основную роль в возникновении электрических явлений в живой растительной клетке.

Надо сказать, что проблема молекулярной организации биологических мембран — одна из наиболее важных в современной биофизике и молекулярной биологии. Ее разработкой заняты виднейшие специалисты — физики, химики, математики и, конечно же, биологи — во всех странах мира. Как и всякая серьезная проблема, она требует очень серьезного подхода и обсуждения очень серьезным языком в кругу очень серьезных специалистов.

Не так давно издаваемый в Америке международный «Журнал клеточной биологии» поместил обзорную статью доктора Теодора Стека, посвященную некоторым вопросам молекулярной структуры биологических мембран. Свои представления доктор Стек иллюстрирует следующей схемой (рис. 10).

В советском реферативном журнале «Биофизика» кратко изложена статья Стека, причем около трети реферата занимает та же схема. Комментируется она сухим профессиональным языком: «80% всего количества мембранных белков представлено 10 белками, 2 из которых являются трансмембранными с углеводной компонентой, обращенной наружу. Все наружные белки прочно связаны с мембраной благодаря внедрению их гидрофобной компоненты в мембрану. Выходящие на внутреннюю поверхность компоненты частично ассоциированы».

Вот что, оказывается, изображено на рис. 10!

Итак, будем считать, что строение растительной клетки в самых общих чертах нам известно. Мы, правда, избегали разговора о размерах и форме растительных клеток. Для иллюстрации самых общих принципов возникновения электричества в клетках оба фактора совершенно несущественны, но приходится считаться с запросами экспериментаторов. Ведь измерение электрических параметров клетки и ее частей выполнить тем легче, чем крупнее клетка. Как мы уже говорили, большая часть растительных клеток имеет размеры порядка десятков микрон и видна только в микроскоп.

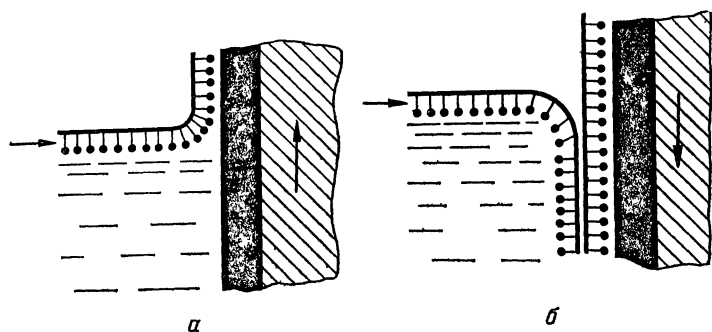


Рис. 9. Образование бимолекулярной пленки

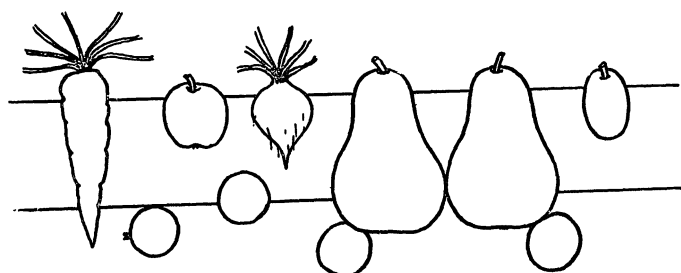


Рис. 10. Молекулярная структура биологической мембраны (Steck T. J. Cell. Biol., 1974, 62, № 1)

Встречаются, конечно, клетки и покрупнее. Взгляните на рис. 11. Изображенное на нем растение-водоросль называется каулерпой. Его форма довольно обычна — от горизонтально тянущегося корневища вверх отходят листья, вниз — корни. На растущем конце корневища видно, как формируются зачатки тех и других органов. Однако заурядный внешний вид обманчив, ибо каулерпа растение одноклеточное. И узловатое корневище, и листья столь характерной для водорослей формы, и лохматые корешки — все это образовано одной-единственной клеткой.

Конечно, клетка эта крайне нетипичная по своему строению и сложности внутренних органов; в ней содержится очень много ядер. А общий размер такой, с позволения сказать, клетки — до полуметра!

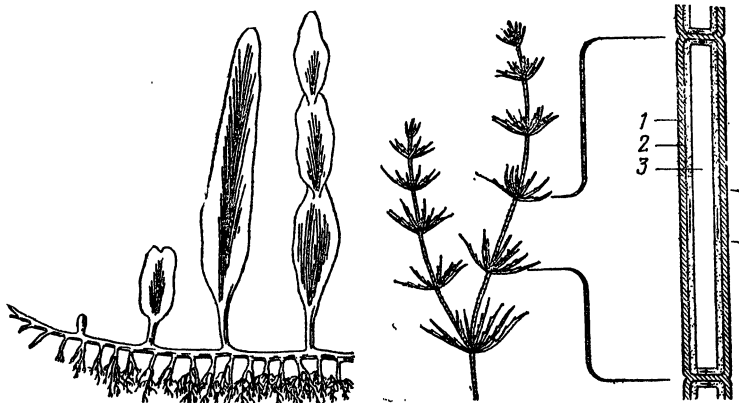


Рис. 11. Водоросль каулерпа. Все растение состоит из одной-единственной клетки

Рис. 12. Строение клетки харовой водоросли: 1 — клеточная стенка; 2 — цитоплазма; 3 — вакуоль

Все же для изучения биоэлектрических явлений каулерпа не годится — очень уж специфична ее физиология и внутреннее строение. В исследованиях подобного рода используются по преимуществу клетки харовых водорослей. Их длина гораздо меньше — «всего» несколько сантиметров, но зато они — типичные во всех отношениях растительные клетки.

Характерные представители харовых водорослей — хара или нителла строением своего «стебля» чем-то напоминают хвощ (рис. 12). Через каждые 2—3 см от «стебля» в виде мутовок отходят тонкие круглые «листочки». А участок «стебля» между двумя мутовками представляет собой одну клетку. Она имеет круглое сечение и диаметр порядка десятых долей миллиметра. Снаружи клетка покрыта довольно толстой оболочкой, большая часть внутреннего содержимого — вакуоль. А если измерить разность электрических потенциалов между вакуолью и наружной водной средой, в которой живет водоросль, окажется, что она составляет довольно внушительную величину — 0,15 В.

Один электрод вводится внутрь клетки...

Если измерить... Но как? Конечно, ботаники часто называют клетки нителлы гигантскими, и к тому, как мы уже говорили, есть основания. Но вот этот «гигант» лежит перед вами в сосуде с водой — тоненькая, нежная зеленая ниточка... Как разобрать — где тут у нее оболочка, где вакуоль. Нет, здесь определенно не обойтись без микроскопа.

Описывать микроскоп мы не станем — наверняка каждый из читателей хоть раз в него заглядывал. А вот о некоторых очень специальных его принадлежностях стоит, пожалуй, сказать несколько слов.

У каждого человека, смотрящего в микроскоп, очень скоро появляется желание вмешаться в происходящее под объективом. Начать толкать вон ту инфузорию в сторону воздушного пузырька, «потрогать» отстающий от клеточной стенки край протоплазмы. И, конечно, не всегда за таким желанием скрывается просто охота позабавиться, — «забравшись внутрь клетки», можно выполнить множество интересных экспериментов.

Но опять же легко сказать — забраться внутрь клетки. Даже при стократном увеличении (в микроскопической практике это увеличение весьма умеренное, при работе с растительными объектами используют и гораздо большие увеличения) видимое перемещение инструмента в поле зрения микроскопа на полсантиметра на самом деле означает его сдвиг всего на 50 микрон.

Были разработаны сотни конструкций так называемых микроманипуляторов. Инструмент, закрепленный в держателе такого прибора (инструмент — это обычно очень тонкая игла), плавно перемещается взад-вперед, вправо-влево и вверх-вниз с помощью вращения одной из трех рукояток. На рукоятках нанесены шкалы подачи в микронах. Само устройство подачи может быть механическим, использующим микрометрические винты, гидравлическим или пьезоэлектрическим. Очевидно, подвижные детали должны быть тщательно подогнаны друг к другу, чтобы избежать мельчайших дрожаний при движениях. Ведь лучшие конструкции микроманипуляторов обеспечивают точность подачи 1-2 микрона.

С развитием техники микроскопических исследований появился специальный термин — «микрургия». Современные микрургические аппараты представляют собой очень

сложные устройства таких больших размеров, что собственно микроскоп совершенно теряется в хитросплетениях массивных кронштейнов, нагромождении рукояток и измерительных приборов.

Иными словами, при современной микроургической технике не так уж трудно ввести электрод внутрь клетки, да еще такой огромной, как клетка нителлы. Достаточно иметь микроскоп и микроманипулятор. Давайте лучше подумаем, какой электрод для этой цели нужен.

Напоминаем: нам нужно измерить разность электрических потенциалов между вакуолью и окружающей средой. Это значит, что один электрод мы должны погрузить в наружный раствор, другой — в вакуоль, соединить их через вольтметр и посмотреть, какую цифру покажет его стрелка.

Знающий человек в этом месте тонко улыбнется и начнет что-то говорить про усилители, входные сопротивления и гитоомы. Действительно, для успеха опыта нужны и усилители и все прочее, для понимания же общих принципов — нет.

Ввести внутрь клетки проволочку нельзя: она будет в контакте и с наружным раствором, и с протоплазмой. Проводник, идущий внутрь клетки, должен быть от них надежно изолирован и находиться в контакте только и именно с вакуолярной жидкостью — клеточным соком.

Было найдено очень простое решение этой проблемы. Известно, что если нагреть какой-то участок тонкой стеклянной трубки, например в пламени спиртовки, и затем растянуть до разрыва, ее концы в месте разрыва превратятся во все сужающуюся нить, внутри которой, однако, прекрасно сохранится полость. Такая трубка напоминает обычную пипетку, только диаметр ее кончика очень мал. Если подобрать подходящие сорт стекла, температуру нагрева и усилие, с которым производится растяжение, — он может быть равным, например, одному микрону — одной сотой части диаметра человеческого волоса.

Если теперь такую «пипетку» заполнить раствором электролита (например, хлористого калия) и в толстую ее часть ввести кусок проволоки — мы получим микроэлектрод, прекрасно удовлетворяющий требованиям наших измерений. В самом деле, кончик его достаточно тонок, так что введение его вовнутрь клетка не почувствует и будет продолжать функционировать вполне нормально. С помощью микроскопа и микроманипулятора легко до-

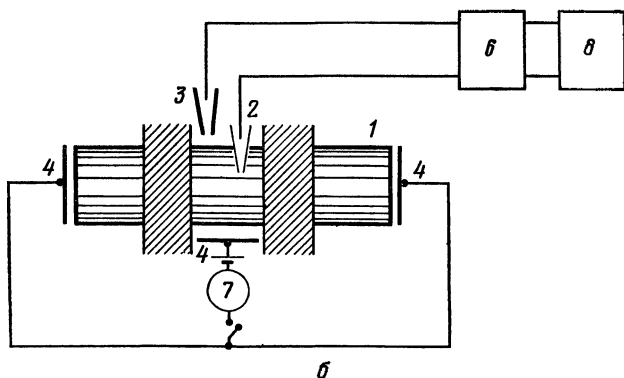
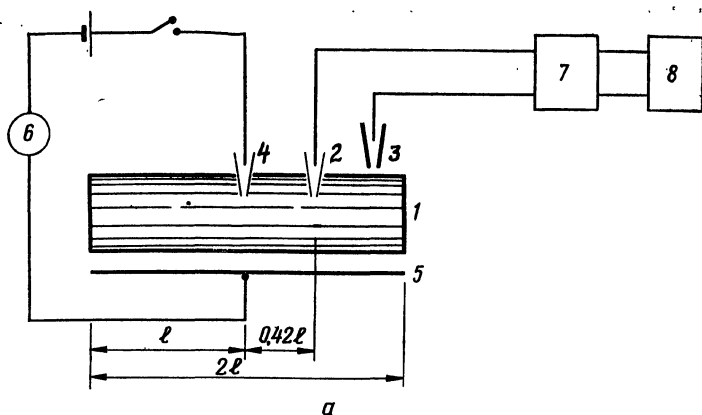


Рис. 13. Схема измерения электрических характеристик протоплазматической мембраны клеток харовых водорослей: 1 — клетка; 2 — микроэлектрод для измерения разности электрических потенциалов; 3 — электрод сравнения; 4, 5 — микроэлектрод и серебряные проволоки для пропускания импульса тока; 6, 7, 8 — регистрирующие приборы

биться, чтобы его кончик располагался именно в вакуоли — и тогда можно быть уверенным в том, что достигнут электрический контакт только с ней.

Экспериментальная установка наглядно изображена на схеме (рис. 13). Если же говорить о технической стороне эксперимента, то следует иметь в виду, что и электроизмерительные, и механические устройства, упомянутые и неупомянутые в нашем описании, достаточно сложны. Тем не менее измерения подобного рода стали в наши

дни делом вполне обычным и вошли в практику многих научных лабораторий.

Итак, погружаем один электрод в окружающий раствор, второй вводим внутрь клетки. Смотрим на вольтметр. Напряжение — 0,15 В.

Попробуем разобраться

Пока что мы преподносили эти 0,15 В как факт. И просим читателя нам верить: мы неоднократно все это проделывали и видели своими глазами показания прибора. И не только мы — можно сослаться на десятки свидетельств очевидцев во всех концах света.

Ну что ж, пусть считается доказанным, что некие электрические явления могут наблюдаться на уровне отдельной клетки. Но именно здесь естественным образом возникает вопрос: а почему? Откуда взялась разность потенциалов между вакуолью и наружным раствором?

Если принять сам факт существования клетки в том виде, как она была описана выше, ответить на этот вопрос совсем нетрудно. Для этого, правда, предварительно придется сказать несколько слов об электричестве вообще. Конечно, читатель знает, что электричество существует в форме положительных или отрицательных зарядов, что одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются. Предполагается также известным, что водные растворы солей представляют собой смесь положительно и отрицательно заряженных частиц — ионов, причем первые называются катионами, вторые — анионами.

Катионы и анионы в растворе равномерно перемешаны, так, что действующие на каждую частицу силы притяжения и отталкивания со стороны прочих частиц примерно компенсируют друг друга. Силы же эти весьма велики, и поэтому в сколько-нибудь значительном объеме раствора количество анионов и катионов всегда строго сбалансировано.

Это относится, разумеется, ко всем носителям электрических зарядов в любом веществе. В противном случае... Вот что пишет в своих лекциях по физике Ричард Фейнман: «Если бы в вашем теле и в теле вашего соседа (стоящего от вас на расстоянии вытянутой руки) электронов оказалось бы всего на 1% больше, чем протонов, то сила

вашего отталкивания была бы невообразимо большой. Насколько большой? Достаточной, чтобы поднять небоскреб? Больше! Достаточной, чтобы поднять гору Эверест? Больше! Силы отталкивания хватило бы, чтобы поднять «вес», равный весу Земли». Вот какого масштаба силы следят за тем, чтобы катионы и анионы в растворе были перемешаны равномерно.

Пусть все же нам удалось добиться — неважно пока каким образом — некоторого нарушения равенства концентрации катионов и анионов в различных частях раствора: скажем, в правой части сосуда анионов чуточку больше, чем катионов, в левой — меньше. Рассмотрим теперь ситуацию, в которой оказывается некий единичный анион в пограничной области. Ясно, что справа на него будут действовать по преимуществу силы отталкивания — справа анионов больше, чем катионов. Эти силы будут стремиться переместить анион справа налево. С противоположной стороны на него действуют в большей мере силы притяжения — и они «подталкивают» его в том же направлении. Вспомнив начальные разделы школьного учебника физики, можно сказать, что к выбранному нами аниону приложены многие силы, равнодействующая которых направлена справа налево. Эта сила равна нулю «в глубине» каждого из «отделений» раствора — там, где влияние другого «отделения» уже не чувствуется (напомним, что силы электростатического взаимодействия падают обратно пропорционально квадрату расстояния между заряженными частицами).

Вспоминая школьный курс физики, мы вскоре придем к выводу, что при перемещении нашего аниона из правой части раствора в левую под действием данной силы производится некоторая работа. Помните — сила, умноженная на путь действия, и т. п.

Ясно, что эта величина будет тем больше, чем более нарушена электронейтральность в обоих отделениях, или, как еще говорят, чем больше существующая между ними разность электрических потенциалов. Работа, соответствующая перемещению аниона между двумя отделениями, пропорциональна разности электрических потенциалов. Иначе можно сказать, что эта работа является мерой разности потенциалов. А разность электрических потенциалов и напряжение — синонимы.

Пора вернуться к нашей клетке и к нашему опыту. Взглянув еще раз на вольтметр, отметим, что его стрелка

отклоняется на те самые 0,15 В в «минусовую» сторону; это означает, что вакуоль заряжена отрицательно по отношению к наружной среде. Значит, рассуждая грубо, у внутренней поверхности анионов несколько больше, чем катионов, у наружной — меньше. И теперь, когда мы наконец объяснили, что означает показание вольтметра, опять зададим вопрос: а почему?

Впрочем, немедленного ответа не последует и сейчас. Сначала нам придется порассуждать о диффузии — одном из процессов переноса вещества. Повседневный опыт учит, что вещества в растворе, газы в любом пространстве передвигаются из областей первоначально более высоких концентраций в области низких концентраций. Такой способ их распространения должен в конечном счете привести к полностью равномерному их распределению в некотором объеме.

Бросьте в стакан воды кристаллик марганцовки, и вы увидите, как над ним сначала вьется розоватый «дымок», потом вода в стакане начнет неравномерно темнеть, пока, наконец, кристаллик полностью не растворится, и вся вода не примет равномерную окраску. Аналогично, плесните в одном углу комнаты несколько капель серного эфира — и его запах начнет распространяться все дальше и дальше от этого места, пока весь эфир не испарится, а комната не пропахнет вполне равномерно. Оба примера в известном смысле классические и позаимствованы нами из университетских учебников физиологии растений конца прошлого века, где они служили наглядной иллюстрацией процесса диффузии. В том что именно так — из областей большей концентрации в области меньшей концентрации — должны самопроизвольно распространяться газы или растворенные вещества, — легко убедиться. Пусть в некотором изолированном объеме в одной части больше молекул газа, чем в другой (рис. 14, а). Как известно, молекулы газа движутся беспорядочно — каждая из них с равной вероятностью может двигаться в любом направлении. Теперь мысленно разделим плоскостью обе части сосуда, изображенного на рис. 14, а, и подсчитаем, какое количество молекул в единицу времени должно пересекать эту плоскость в направлении слева направо и справа налево.

Собственно, количество нам безразлично; важно, что и в первом и во втором случае оно будет пропорционально

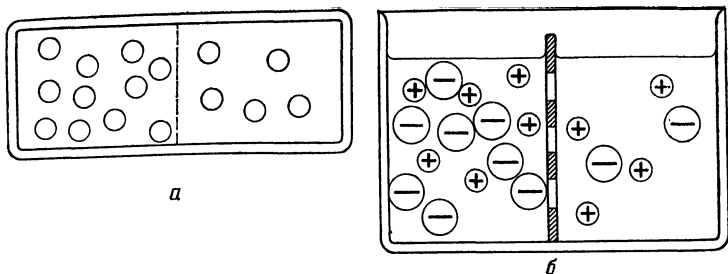


Рис. 14. Эти рисунки иллюстрируют рассуждения, приведенные на этой и соседней страницах: *а* — замкнутый сосуд с неравномерно распределенным газом; *б* — возникновение разности электрических потенциалов на полупроницаемой мембране

числу молекул в некотором слое, прилегающем к плоскости раздела.

Значит — слева направо (в нашем случае) будет перемещаться больше молекул, чем справа налево — до тех пор пока оба потока не уравниются, — что, очевидно, наступит при равенстве концентрации газа в сосуде.

А теперь вместо мысленной перегородки рассмотрим вполне реальную, и заменим в наших рассуждениях газ растворами электролитов. Пусть в оба отделения сосуда, изображенного на рис. 14, *б*, налиты водные растворы хлористого калия разной концентрации — слева несколько большей, чем справа. Разделяющая же оба отделения перегородка — мембрана — проницаема только для ионов калия.

В условном изображении рис. 14, *б* это происходит потому, что диаметр отверстий в мембране достаточно велик для их прохождения, но слишком мал для того, чтобы сквозь мембрану могли пройти более крупные ионы хлора. Просим относиться к этому как к очередной идеализации — на самом деле причины различия в проницаемости мембран к ионам хлора и калия имеют несколько иную (и более сложную) природу.

Что же произойдет в такой системе? По аналогии с только что рассмотренным случаем, ионы калия будут стремиться покинуть левое отделение сосуда — их поток слева направо будет большим, чем справа налево. Концентрация ионов хлора, естественно, никаким перераспределением подвергаться не будет. Но именно поэтому по мере выхода ионов калия из левого отделения между

обеими сторонами мембраны начнет возрастать разность потенциалов — слева окажется больше анионов, справа — катионов. А это значит, как мы уже знаем, что возникнет сила, действующая на катионы в обратном направлении — со стороны раствора меньшей концентрации, т. е. справа налево. Чем больше нарушается электронейтральность, тем больше эта сила, и в конце концов наступает некоторое равновесие — количество ионов калия, покидающих в единицу времени левое отделение из-за существования разности концентраций, уравнивается с числом ионов, пересекающих мембрану в обратном направлении под действием возникшей разности электрических потенциалов.

Очевидно, что чем большей окажется разность концентраций по обе стороны мембраны, тем больше диффузионный поток катионов слева направо и тем большая разность потенциалов обеспечивает равновесие. Зависимость между этими величинами определяется следующей закономерностью: с ростом отношений концентраций по обе стороны мембраны в геометрической прогрессии разность потенциалов растет в прогрессии арифметической. Избегая формул и экскурсов в очень специальные разделы физической химии, мы приводим этот факт без объяснения. Сообщим лишь следующую полезную цифру: для мембраны, полностью непроницаемой для одного из ионов, десятикратное увеличение концентрации электролита с любой стороны мембраны приводит к изменению разности электрических потенциалов на 0,058 В.

Значит, для того чтобы получить столько уж раз упоминавшееся напряжение 0,15 В, необходимо, чтобы концентрация электролита в вакуоли нителлы почти в 1000 раз превосходила его концентрацию в среде. Химический анализ клеточного сока и прудовой воды показал именно такое соотношение между этими концентрациями.

Вот теперь, наконец, получено собственно объяснение причины возникновения разности потенциалов в биологических тканях, и причина эта чрезвычайно проста — различие концентраций электролитов.

Каждому читателю, конечно, ясно, что приведенное нами объяснение может рассматриваться лишь как начало разговора о природе растительного электричества. После этого, правда, не кажется более удивительным факт существования в растительных тканях разностей электрических потенциалов — наоборот, было бы удиви-

тельно, если бы их не было. Ведь это означало бы абсолютное равенство концентраций электролитов во всех органах, клетках, частях клеток и наружных растворах либо полное совпадение величины проницаемостей всех катионов и анионов. Согласитесь — странным казался бы любой из этих вариантов...

Обратите внимание и на следующее обстоятельство: мы пришли к выводу, что наличие разности потенциалов в растительных тканях можно было бы предсказать с помощью одних только рассуждений, совершенно не прибегая к гальванометрам и электродам. На самом же деле, как мы знаем, все обстояло как раз наоборот: электричество в растениях было открыто экспериментально и на протяжении многих десятилетий сам факт его существования вызывал почтительное недоумение исследователей. Для того чтобы сформулировать те несложные рассуждения, которые мы с вами только что проделали мельком и без видимого напряжения, и выразить их результаты в виде уравнений, понадобился гений двух гигантов, стоявших у колыбели зарождавшейся тогда новой науки — физической химии. Мы имеем в виду Вальтера Нернста и Вильгельма Оствальда. Нернст, как известно, является одним из творцов термодинамики. Говоря же о роли Оствальда, хочется вспомнить один из номеров немецкого «Журнала физической химии» за 1932 г. Его первая страница обведена траурной рамкой, а посередине значится единственная фраза: «4 апреля этого года наша отрасль науки потеряла своего основателя — Вильгельма Оствальда».

Ботаник не боится трудностей

Оставим на время физико-химические соображения и взглянем на тот же круг проблем глазами биолога. Сам по себе напрашивается вопрос: играют ли электрические явления в растениях физиологическую роль, или это просто побочное (и, как мы теперь знаем, практически неизбежное) следствие неравномерного распределения концентраций ионов? Далее, независимо от того, каким будет ответ на первый вопрос, можно ли с помощью измерения электрических эффектов получить полезную информацию о тех или иных процессах жизнедеятельности? Каким образом электрические характеристики клеток и тканей

зависят от внешних условий? Иными словами, дело за вполне конкретными исследованиями электрических свойств растительной клетки. До сих пор мы говорили лишь об одном показателе — разности электрических потенциалов между вакуолью и наружной средой (так называемый потенциал покоя). Но этим показателем вовсе не исчерпывается описание электрических свойств клетки.

Вот хотя бы электрическое сопротивление клеточной мембраны. Как его измерить? Ведь в отличие от разности потенциалов эта величина должна быть отнесена к единице поверхности мембраны.

Приходится еще больше усложнять и без того, как мы помним, непростую процедуру микроэлектродных измерений. Внутри клетки вводится не один электрод, а два, причем один — примерно в середине клетки, второй — на определенном от него расстоянии, ближе к одному из концов. Вдоль клетки и параллельно ей в наружном растворе размещается проволока (рис. 13, а). Теперь пропустим через первый микроэлектрод и проволоку импульс тока. При этом величина разности электрических потенциалов, регистрируемая с помощью второго электрода, очевидно, будет меняться тем сильнее, чем больше сопротивление клеточной мембраны.

Возможна другая, и тоже довольно сложная, схема измерения. В клетку вводится только один микроэлектрод, однако сама клетка помещается в камеру, разделенную на три электрически изолированных отсека (рис. 13, б). Теперь импульс тока пропускается между наружным электродом, находящимся в центральном отсеке, и двумя такими же электродами, расположенными в крайних отсеках. С помощью введенного внутрь клетки микроэлектрода регистрируется вызываемое этим импульсом изменение потенциала покоя. На основании результатов таких измерений также можно вычислить значение сопротивления клеточной мембраны. Поскольку перенос тока через мембрану осуществляется ионами, ее сопротивление тем выше, чем меньше проницаемость для каждого сорта ионов и чем ниже их концентрация в окружающем растворе и вакуоли.

И вот опять мы сталкиваемся с необходимостью измерения концентрации ионов в клеточном соке. Без этого, как выясняется, совершенно невозможно осмыслить результаты электрических измерений, полученных с помощью столь сложных и кропотливых экспериментов.

Определить концентрацию отдельных ионов в вакуоли отдельной клетки... Но, опять же, — как? Даже в клетке нителлы — той самой, гигантской, — объем вакуоли 3 мм^3 , а калия в нем содержится $0,01 \text{ мг}$.

Потом — попробуйте-ка выдавить из клетки именно вакуолярный сок; это тоже не так просто.

Конечно, эти трудности не остановили исследователей. Были разработаны остроумнейшие препаративные приемы, созданы специальные устройства для извлечения клеточного сока, а для определения концентрации ионов использовались чувствительные спектральные приборы. И все же точность измерения внутренних концентраций оставляла желать лучшего: значительны потери клеточного сока, невысока точность определения сверхмикроскопических количеств солей, ну и, наконец, сама процедура очень сложна.

Гораздо надежнее и элегантнее методы, использующие радиоактивные изотопы. Например, такой: растение «от рождения» выращивается на питательной смеси, содержащей радиоактивный натрий (скажем, один процент от общего количества натрия в растворе). Для растения практически нет разницы между изотопным и «нормальным» ионом натрия, поэтому пропорция $1:100$ сохраняется также и в вакуолярном растворе. Если теперь из такой клетки выделить клеточный сок, определение содержания в нем натрия не представит ни малейшего труда, — точность приборов — индикаторов радиоактивных измерений очень высока и они просты в обращении. Можно, впрочем, и не выделять клеточный сок, а вычислить внутриклеточную концентрацию натрия на основании временной кривой роста радиоактивности воды, в которую переносится клетка, «накормленная» изотопным натрием. Возможны и другие приемы оценки вакуолярных концентраций с помощью изотопов: все они более приемлемы для таких измерений, чем химические методы, но все же — долго, сложно... Нельзя ли еще проще?

На помощь пришли микроэлектроды особой конструкции. Чувствительный кончик такого электрода изготовлен из особого сорта стекла; в отличие от рассматривавшихся ранее микроэлектродов они запаяны наглухо. Стекло, используемое для изготовления кончика, — так называемое ионоселективное, — обладает очень высокой проницаемостью по отношению к какому-либо одному сорту ионов,

например к иону калия, и практически непроницаемо для других ионов.

В основу измерений, выполняемых с помощью такого электрода, положен только что рассмотренный эффект: возникновение разности электрических потенциалов по обе стороны полупроницаемой мембраны. Сначала экспериментально устанавливается зависимость между величиной этого потенциала и концентрацией раствора, в который погружен кончик электрода. Дальнейшие же действия совершенно очевидны: ионоселективный электрод вводится в вакуоль, туда же вводится обычный микроэлектрод (электрод сравнения), и по показанию вольтметра с помощью построенной ранее зависимости устанавливается внутриклеточная концентрация калия. Точность этого метода ниже изотопных (присутствие посторонних ионов все же в некоторой мере сказывается), но зато он гораздо производительнее, а самое главное позволяет сохранить клетку вполне жизнеспособной, пригодной для дальнейших измерений. Дело здесь, конечно, не в том, чтобы экономить подопытный материал — очень важно выполнить все измерения на одной и той же клетке.

Но до чего быстро растут аппетиты экспериментаторов! В самом деле, не успели научиться измерять вакуолярные концентрации ионов — уже захотелось им заменять клеточный сок растворами произвольного состава.

Конечно, очень интересно исследовать зависимость электрических явлений в клетке от концентрации ионов в вакуоли; более того, внутренние концентрации будут при этом известны точно — ведь экспериментатор сам может готовить искусственный клеточный сок в пробирке, и добавлять туда что угодно, и...

Словом, достоинств такого подхода не счесть. Остался совершенный пустяк — заправить клетку этим самым искусственным соком. Ботаник, хоть и мечтатель по натуре, не привык ограничиваться одними только мечтами. И вот уже появляются сообщения об искусниках, которые, отрезав концы клетки харовой водоросли, сумели ввести в отверстия на торцах микропипетки и прокачивать через вакуоль раствор произвольного состава (рис. 15). Конечно, клетка (точнее, то, что от нее осталось) жила в таком состоянии совсем недолго, — чему, впрочем, удивляться не приходится. А для производства электрических измерений нужно время, для смены наружных раство-

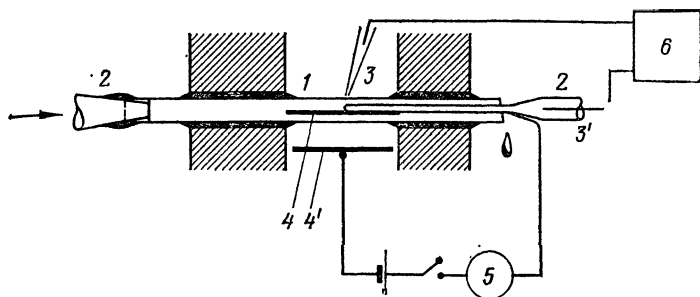


Рис. 15. Схема перфузии клетки харовой водоросли с отрезанными концами: 1 — клетка; 2 — микропипетки для прокачивания искусственного клеточного сока; 3, 3' — электроды для измерения разности электрических потенциалов; 4, 4' — электроды для пропускания электрического тока; 5 — гальванометр; 6 — электрометр

ров — тоже, не говоря уж о замене внутреннего раствора. Не успев толком освоить возможности нового метода, ботаники опять начинают ворчать — не дело, мол, работать на погибающей клетке. Надо что-то придумать, чтобы клетка и не заметила, как ей подменили клеточный сок. Тогда можно будет на одной клетке менять его по нескольку раз.

Эксперимент по замене содержимого вакуоли с сохранением полной жизнеспособности клетки в конце концов тоже удался. Это произошло впервые в Минске, и мы хотим описать этот опыт подробнее. Главным образом потому, что мы видели все с самого начала своими глазами.

Как очень немногие очевидцы создания методики прижизненной перфузии (последнее слово как раз и означает прокачивание искусственного раствора через клетку), мы могли бы без особого риска разоблачения выдать совершенно феерическую и захватывающую дух историю. Однако, после долгих колебаний, мы решили придерживаться голой и скучноватой правды.

Главный герой нашей истории — человек преувеличенно скромный; щадя эту скромность, мы будем называть его по имени-отчеству — Аркадий Васильевич.

Прочитав статью о перфузии клетки с отрезанными концами, Аркадий Васильевич произнес:

— Это же все равно, что у человека отхватить одну руку, одну ногу, а потом измерять его кровавое давление.

Не знаем, что более сквозило в этих словах — сострадание к бедной клетке или недоверие к получаемым на такой клетке результатам. Во всяком случае, Аркадий Васильевич принялся за работу, длившуюся более года.

Вот что у него получилось. В клетку нителлы с торцов вводятся две стеклянные микроиглы. По конструкции они в точности напоминают стеклянный микроэлектрод, только кончик у них значительно толще — 30 микрон («всего лишь» треть толщины человеческого волоса). Ткань торцов клетки — почти полностью омертвевшая, и механические повреждения, связанные с введением микроигл, клеткой практически не чувствуются. Однако в то же время торцевая ткань и более жесткая, она намного плотнее, чем ткань боковых стенок. Поэтому при введении в торец микроигла закупоривается пробочкой, вырезанной из стенки. Аркадий Васильевич убедился, что сидит эта пробочка очень плотно и выбить ее, увеличивая давление жидкости в микроигле, нельзя. Тогда он изготовил микроиглу специальной конструкции — с острым закрытым кончиком, оттягивающимся вовнутрь. В момент прокалывания торца клетки кончик выдвинут вперед, закрывая отверстие микроиглы и образуя вместе с ее корпусом хорошо заточенный конус. После введения микроиглы кончик оттягивается (рис. 16, а, б), освобождая путь перфузату — жидкости, закачиваемой в клетку. Вторая микроигла служит для оттока вакуолярной жидкости наружу.

Одним словом, конструкция кажется простой и естественной, если бы не одно пустяковое обстоятельство — диаметр кончика, напоминаем, 30 микрон, а толщина его стенки — менее микрона.

Представляете себе, с какой точностью должны быть подогнаны детали микроиглы друг к другу? Сместится чуть-чуть в сторону подвижный кончик, надавит на край выходного отверстия микроиглы — оно лопнет, образуется небольшой зазор между двумя частями кончика — при введении микроиглы в клетку туда могут набиться частицы ткани и устройство заклинит. Словом, чтобы иглы такой конструкции работали безотказно, необходима фантастическая точность при их изготовлении.

Но, как оказывается, даже обладая столь совершенным инструментом, перфузию осуществить не так-то просто. Дело в том, что клеточный сок в растительной клетке находится под значительным давлением — около 8 ат-

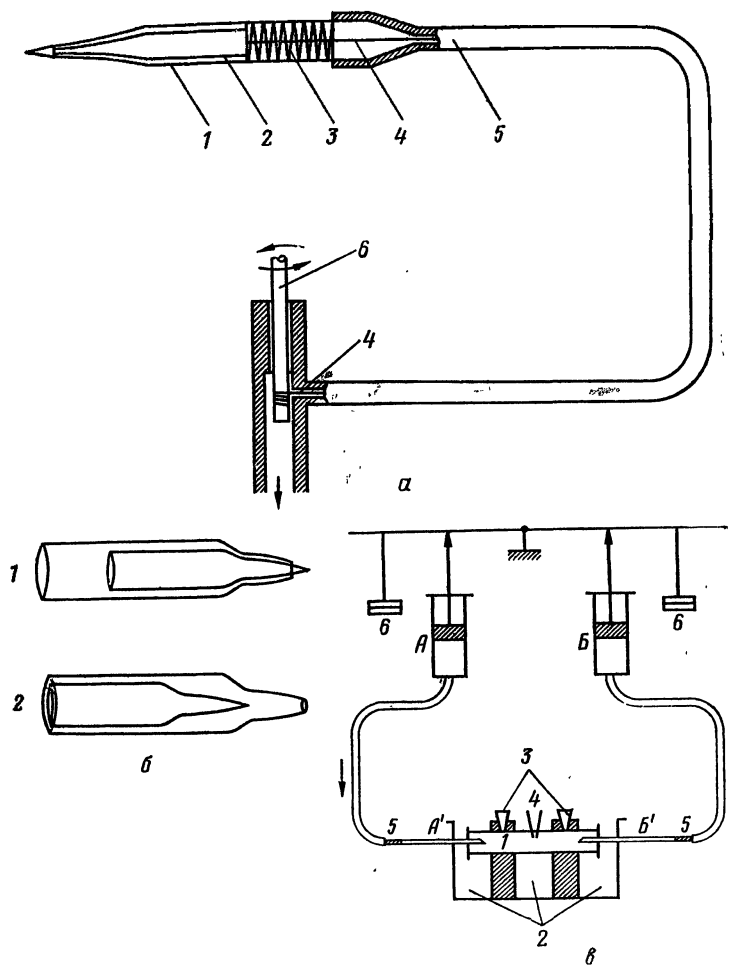


Рис. 16. Прижизненная перфузия клеток харовых водорослей: *a* — схема работы иглы с изменяющейся геометрией: 1 — микроигла; 2 — внутренний запаянный микрокапилляр; 3 — пружина; 4 — трос; 5 — гибкий шланг; 6 — ось; *б* — устройство микроиглы с изменяющейся геометрией: 1 — во время введения в клетку; 2 — во время проведения перфузии; *в* — схема установки для проведения перфузии: 1 — клетка; 2 — отсеки камеры; 3 — зажимы; 4 — измерительный электрод; 5 — демпферы; 6 — груз для создания гидростатического давления; *A'*, *B'* — микроиглы для пропускания искусственного вакуолярного сока; *A*, *B* — стеклянные шприцы

мосфер. Если вам приходилось наблюдать процесс взламывания асфальта с помощью пневматического перфоратора, вы, несомненно, заметили, с каким бешеным свистом вырывается наружу отработавший воздух. А ведь он подается под давлением 5—7 атмосфер! Не будем отвлекаться на объяснения, почему же клетка не разлетается вдребезги; скажем лишь, что причиной тому весьма малые ее размеры.

Высокое внутриклеточное давление возникает из-за все той же разности концентраций клеточного сока и наружной среды. Представим себе закрытый мешочек, например из целлофана, наполненный концентрированным водным раствором какого угодно вещества и погруженный в раствор значительно меньшей концентрации.

Вода проходит через целлофан достаточно свободно, растворенное вещество — нет. Но ведь тогда воду можно попросту исключить из рассмотрения, а растворенное вещество будет вести себя как газ. Внутри мешочка его концентрация высока, снаружи — мала; следовательно, изнутри на стенки мешочка будет действовать сильное давление. Давление со стороны более концентрированного раствора на полупроницаемую мембрану называется осмотическим давлением. Упругая клеточная стенка сдерживает заключенный внутри протопласт в его стремлении раздаться пошире, но как только внутрь клетки водится микроигла, в нее устремляется клеточный сок.

Поэтому Аркадию Васильевичу пришлось еще немало повозиться, добиваясь создания в самой микроигле точно такого же давления, что и в клетке, а затем научиться сбалансированно прокачивать через вакуоль перфузат таким образом, чтобы его приток был равен оттоку — клетка не должна ни раздуваться, ни тощать (рис. 16, в).

Не будем более утомлять читателя описанием сверхминиатюрных гидравлических устройств, нежнейших пневматических приводов и тому подобных хитроумных выдумок, которыми изобилует установка Аркадия Васильевича. Главное, что благодаря им удалось осуществить по-настоящему прижизненную перфузию. Перфузированная клетка живет сутками, сохраняя все признаки нормального функционирования: стабильный потенциал покоя, движение протоплазмы. Внутрь клетки закачиваются растворы любого ионного состава, приборы-самописцы регистрируют изменения ее электрических характеристик, а клетка по-прежнему живет.

Объясняя происхождение электричества в растениях, нельзя ограничиться той схемой, которую мы рассмотрели в предыдущей главе. Ибо если всякое «растительное электричество» есть результат неравномерного (и очень сильно неравномерного!) распределения ионов между различными частями растения и средой, вполне естественным образом возникает вопрос о причинах, порождающих такую неравномерность. Мы писали выше, что для возникновения разности потенциалов 0,15 В между клеткой водоросли и водой, в которой она живет, необходимо, чтобы концентрация калия в вакуоли была примерно в тысячу раз выше, чем в «забортной» воде. Но мы писали также и о диффузии, о самопроизвольном стремлении растворенного вещества равномерно распределиться по доступному объему. Почему же в растениях этого не происходит?

В поисках хотя бы самого общего ответа на этот вопрос мы должны затронуть проблему огромной важности, одну из центральных в современной биофизике — проблему активного переноса ионов через биологические мембраны.

Растения-алхимики, растения-геологи и золото из морской воды

Опять начнем с перечисления фактов. Почти всегда содержание солей в растении выше, чем в почвенном растворе или (если это водное растение) в окружающей воде. Факт этот известен с очень давних пор и среди ботаников

во все времена воспринимался как нечто вполне естественное, а способность растения поглощать из внешней среды минеральные вещества — как важнейшая жизненная функция растения.

Мы уже говорили, например, что водоросль нителла способна накапливать калий в концентрациях, примерно в тысячу раз больших, чем в окружающем растворе. Напомним, что калий — один из основных питательных элементов растений и что калийные удобрения — важнейший вид минеральных удобрений. Интересно, что во многих языках именно со способностью растений к накоплению калия связано само его название: поташ — старое название углекислого калия в немецком языке, откуда оно пришло и в другие языки, в частности русский. Англичанин Дэви, открывший калий как элемент в 1807 г., назвал его *potassium*. Однако первоначальное значение немецкого *die Pottasche* — растительная зола (из нее и добывался в прошлом углекислый калий).

Впрочем вернемся к существу дела. Калий не единственный элемент, который накапливается растениями, и даже не самый показательный в этом смысле. Не так давно была исследована накопительная способность некоторых пресноводных водорослей в отношении элементов, малораспространенных в водоемах, — кобальта, германия, иттрия, циркония, церия и некоторых других. В значительных концентрациях большинство из этих ионов ядовито, и для опыта брались очень низкие их концентрации — что, Впрочем, не отразилось на точности измерений, поскольку использовались радиоактивные изотопы и весьма чувствительные счетчики. Накопительная способность водорослей характеризовалась так называемым коэффициентом накопления

$$K = \frac{\text{концентрация иона в клетке}}{\text{концентрация иона в наружной среде}} .$$

Оказалось, что у водоросли кладофора ффракта эта величина составила по цинку 6000, по кадмию — 16 000, по цезию — 35 000, а по иттрию — почти 120 000. Иными словами, один грамм водоросли «выбирает» весь иттрий из десяти ведер воды. Поскольку же, повторяем, речь идет о крайне малых абсолютных концентрациях, обнаружение перечисленных ионов в клетке химическими методами оказалось бы уже делом очень трудным, а в на-

ружной среде — просто невозможным. Поэтому следует ли удивляться, что некоторые исследователи середины прошлого века при анализе золы растений, выращенных на искусственных средах, вдруг стали обнаруживать элементы, которых в средах не содержалось вовсе. Внешне опыты выглядели вполне убедительно: растения выращивались в так называемых водных культурах, т. е. их корневая система развивалась в растворах определенного состава, из которых экспериментатор полностью исключал ряд элементов, например магний, кальций, но они, как ни в чем не бывало, появлялись в золе растения.

В действительности же скорее всего дело в том, что возможности химического анализа при контроле ионного состава питательных сред имели какой-то «потолок» точности, концентрация исключаемых элементов в растворе не превышала некоторую, пусть даже весьма малую, величину, доступную для обнаружения при анализе. Однако концентрации тех же элементов в растительной золе могут быть, как убеждают приводившиеся примеры, в сотни или тысячи раз выше, и теми же самыми методами их легко обнаружить. Помимо этого, если говорить конкретно о кальции и магнии, довольно значительные их количества могут вымываться из стеклянных стенок сосудов. Одним словом, результаты такого рода могли бы получить вполне разумное истолкование, тем более что во второй половине XIX в. алхимию всерьез никто не воспринимал. Но велика вера ботаника в собственные экспериментальные результаты!

Немецкий профессор Альфред фон Герцееле был, несомненно, исследователем крайне добросовестным. Он многократно повторял свои опыты по выращиванию растений на дистиллированной воде и неизменно наблюдал одно и то же: в золе таких растений обнаруживаются (и совершенно неизвестно откуда) значительные количества калия, фосфора, магния, кальция и серы. Когда профессора покинули последние сомнения (это произошло в 1873 г.), он опубликовал обстоятельную статью с описанием своих опытов. К чести его, надо отметить, что никакой сенсационности он своему сообщению не придавал и вообще никак не истолковывал эти результаты.

Как, однако, выяснилось много десятилетий спустя, работе фон Герцееле суждено было стать одним из классических трудов алхимии нового времени. Его опыты

повторялись в разнообразных модификациях десятки и сотни раз, в том числе и совсем недавно.

В 1959 г. появилось сообщение некоего профессора Баранже из Парижа о том, что ему удалось подтвердить опыты Герцеле. А вскоре действительный член Академии наук США Луи Кервран дал исчерпывающее объяснение этому факту. Скажем, вам угодно получить калий, в ядре которого содержится 19 протонов (массовое число 39)? Нет ничего проще: бери ядро натрия (11 протонов, массовое число 23) и ядро кислорода (8 протонов, массовое число 16). Сколько вместе получается?

Но реакции ядерного синтеза самопроизвольно идти не могут, да и вообще до сих пор управляемый ядерный синтез осуществить никому не удалось. А растениям — удается, возражает Кервран. Ведь известно, что в любом живом организме все химические превращения происходят при участии ферментов. Так почему же не предположить, что ферменты могут осуществлять также и ядерные реакции? Приводя этот вывод Керврана, научный обозреватель одного польского журнала пишет: «Мне не пужно добавлять, что подобная теория должна вызвать зубовный скрежет у всякого уважающего себя химика». Не только химика, добавим мы от себя, упомянув попутно, что одна из последних статей Керврана появилась в сборнике, посвященном столетию работы Герцеле и носящем название «Алхимия: мечта или действительность?». А буквально несколькими абзацами выше мы писали, что в конце XIX в. алхимию уже никто всерьез не воспринимал...

Более подробно об этой занятной истории рассказано в статье В. Жвирблиса «Биологическая трансмутация» (так Кервран назвал описываемое им явление). Статья помещена во втором номере журнала «Химия и жизнь» за 1977 г. и повествует, в частности, о безуспешных попытках автора обнаружить имена Керврана и Баранже в американских и французских справочниках.

Все перечисленные работы (в том числе несколько книг весьма «солидного» вида) оказываются забавной мистификацией, жертвой которой пали, впрочем, многие вполне серьезные ученые (и даже некоторые почтенные академики).

С другой стороны, это пример того, как одни и те же факты можно представить либо в скучноватом виде пятизначных коэффициентов накопления, либо как цвета-

стую историю, длящуюся уже более столетия. Тем не менее вернемся к коэффициентам накопления и попытаемся взглянуть на проблему с другой стороны — с точки зрения инженера, что ли. Ведь если коэффициенты накопления имеют величину порядка десятков и даже сотен тысяч, невольно возникает мысль, нельзя ли использовать столь замечательные свойства растений в промышленных процессах обогащения руд, разделения смесей и т. д.

Некоторые примеры подобного рода промыслов и производств имеют тысячелетние традиции — хотя бы упоминавшееся производство поташа из растительной золы. Еще в прошлом веке во многих странах Европы существовали заводы по добыче «растительного щелока»; их общая годовая производительность исчислялась тысячами тонн поташа.

К началу нашего века этот промысел полностью утратил свое значение, и вряд ли имеются шансы когда-либо его восстановить, поскольку развилась мощная калиевая индустрия, базирующаяся на огромных залежах калиевых солей. В отношении же будущего другого традиционного промысла — добычи йода из морских водорослей — окончательные прогнозы еще не сделаны. Йод накапливается различными морскими водорослями, но в качестве источника его добычи наибольший интерес представляет ламинария — известная под названием морской капусты.

Эта водоросль на сравнительно незначительных глубинах образует мощные заросли, что облегчает ее заготовку. Содержание йода в ламинарии достигает 0,3%, при концентрации его в морской воде около 0,0001%. Еще в первой половине нашего столетия большие количества йода добывались из золы ламинарии. До начала 30-х годов ежегодная добыча чистого йода из водорослей только в Японии составляла по крайней мере 100 т, поднимаясь в отдельные годы до 250 т. Несколько сравнительно крупных заводов по добыче йода путем озоления водорослей были построены в России во время первой мировой войны, причем заводы в Архангельской области и в Одессе работали еще в середине 30-х годов. В последующие годы промысел йода из водорослей сократился. Как и в случае с поташом, были созданы более выгодные в техническом отношении способы его добычи на базе минерального сырья. Многие специалисты считают,

однако, что в связи с истощением доступных источников сырья и ростом его стоимости создаются экономически оправданные предпосылки для восстановления производства йода из водорослей. С другой стороны, вряд ли такая перспектива обрадует любителей морской капусты — причем мы имеем в виду не столько поклонников сахалинского салата, сколько определенные отрасли пищевой, парфюмерной, химической промышленности, для которых морская капуста стала ценным источником разнообразнейшего органического сырья.

Еще один случай хозяйственного использования растений для добычи минеральных продуктов — производство протравки для красителей из некоторых видов плаунов, обладающих способностью к накоплению значительных количеств алюминия. Впрочем, чемпионом по накоплению алюминия является, по-видимому, один из видов американского ореха — близкий родственник грецкого. В его золе содержится до 37% этого элемента!

У читателя может сложиться впечатление, что использование растений в обогащительных процессах — удел архаичных, примитивных производств, принадлежащих истории. На самом же деле это не так. В последние годы резко возрос интерес к исследованию технологических процессов, основанных на извлечении редких элементов из растворов крайне низких концентраций с помощью растений, преимущественно водорослей и микроорганизмов. Например, хорошие перспективы на будущее имеет добыча селена из золы растений — селенонакопителей. Как известно, по основным химическим свойствам селен весьма близок сере. Обычно селен сопутствует ей в виде примеси в серусодержащих минералах, и его выделение связано со значительными трудностями. Известны попытки использовать для этой цели растения, поглощающие из почвы соединения селена более интенсивно, чем соответствующие серные соединения. Например, растение степей астрагал содержит иногда столько селена, что вызывает у животных, поедающих эти растения, тяжелое отравление или даже приводит их к гибели.

Это и не удивительно — в сухой массе астрагала содержится 0,4% селена (эту цифру приводит журнал «Природа» (1965, № 4) вслед за немецким «Виссеншафт унд Фортспритт» (1964, № 12). Нам она кажется завышенной; возможно, речь идет о содержании селена в золе — но даже и в этом случае обогащительные способ-

ности астрагала вызывают удивление), в то время как средняя его концентрация в минеральном сырье около 10^{-4} %. В последнее время спрос на селен сильно возрос — он широко используется в фотоэлементах, при производстве нержавеющей стали, специальных видов резины и т. п.; в то же время ежегодная его добыча в мире в середине 60-х годов составляла лишь около 1000 т. В последнее время в США возобновились эксперименты по разработке промышленных методов извлечения селена из астрагала.

По некоторым сведениям, аналогичным образом пытаются организовать обогащение сырья, содержащего весьма редкий и крайне дефицитный в наш электронный век металл — германий, совершенно незаменимый при производстве полупроводников.

Есть сообщения и о других примерах использования растений в обогатительных процессах. В Соединенных Штатах, например, предполагают обратиться к этому методу при добыче цинка. Произрастающий во Флориде щетинник содержит около полуграмма этого элемента в одном килограмме растительной массы; еще выше его содержание в полыни, произрастающей в районе цинковых рудников в Арканзасе, — 3,8 г!

Помимо сухопутных растений-обогатителей интерес технологов вызывают водоросли — потенциальные разработчики неисчерпаемых богатств Мирового океана. «В течение жизни следующего поколения, — пишет инженер Калифорнийского технологического института Дж. Метро, — человечество будет извлекать из океана не только кобальт, никель, но и молибден, ванадий, свинец, цинк, титан, алюминий, цирконий и др.».

Известны многочисленные, хотя, к сожалению, лаконичные, выдержанные в самых общих выражениях сообщения различных зарубежных фирм о разработках обогатительных установок для извлечения «биологическим методом» из растворов и суспензий иттрия, ниобия, ряда редкоземельных элементов, даже золота (хотя, пожалуй, слово «даже» здесь неуместно: сейчас на мировых рынках один грамм золота стоит несколько долларов, в то время как цена одного грамма некоторых редкоземельных металлов — десятки тысяч долларов!). Однако, поскольку изыскание различных экстравагантных способов добычи именно золота было на протяжении столетий навязчивой идеей алхимиков, а впоследствии химиков, не

удивительно, что и «биологические методы» не были обойдены их вниманием.

История попыток добычи золота с помощью растений из почвы или воды интересна главным образом как иллюстрация потенциальных возможностей метода; не последнее значение имеет и гласность результатов исследований, в отличие от большинства прочих разработок в этой области. Трудно определить, к какому времени восходят первые попытки нахождения золота в растениях и различных продуктах растительного происхождения. О том, что к XVII в. опыты подобного рода уже допускали возможность каких-то широких обобщений, свидетельствует, например, трактат Пэймела «*De auro vegetabili et vitibus Hungariae aureis*» («О растительном золоте и золотоносном венгерском винограде»), однако достоверность содержащихся в нем сведений вызывает, мягко говоря, некоторые сомнения. Утверждается, например, со ссылкой на знаменитого алхимика и врача Патерсона Хейна Яноса, что «в венгерском винограде по временам можно находить зерна золота».

Все же подобные трактаты стимулировали впоследствии вполне серьезные исследования. Так, в 1779 г. Руль и д'Арцетт установили присутствие следовых количеств золота во французских винах. Еще позднее Берс выполнил ряд исследований, показав относительно высокое содержание золота в некоторых растительных материалах (например, в зерне овса — 0,0004%). Современные Берсу ученые, однако, отзывались о его работах с большим скептицизмом: он находил золото (причем в изрядных количествах) буквально всюду — в питьевой воде, в крови, моче и т. д.

В конце XVIII в. появилось указание на новый потенциальный источник золота — Мировой океан. Первые анализы дали заметно завышенное содержание этого металла в морской воде — около 60 мг/т (по современным оценкам эта величина колеблется в пределах 0,1 — 1,0 мг/т). Идея использования различных живых организмов для извлечения золота из океана в какой-то момент овладела многими умами; поползли легенды о кораллах и раковинах, накапливающих золото. Большинство из них с самого начала биологи всерьез не воспринимали, однако среди писателей-фантастов они получили широкое хождение. Вот, например, фрагмент из популярного романа Гр. Адамова «Тайна двух океанов», написанного в

1939 г.: «Внезапно зоолог остановился, выпустил руку Павлика и, отбежав в сторону, поднял что-то со дна. Павлик увидел, что ученый рассматривает большую черную, замысловато завитую раковину, засунув металлический палец между ее створок.

— Какая тяжелая... — бормотал зоолог. — Слово кусочек железа... Как странно...

— Что это, Арсен Давидович?

— Павлик! — воскликнул вдруг зоолог, с усилием раскрывая створки и пристально разглядывая заключенное между ними студенистое тело. — Павлик, это новый вид класса пластинчатожаберных. Совершенно неизвестный в науке...

Интерес к таинственному моллюску еще более разгорелся, когда зоолог объявил, что при исследовании строения тела и химического состава крови моллюска Цой нашел в его крови огромное количество растворенного золота, благодаря чему и вес моллюска оказался необычайным.

Ученый пришел к заключению, что, вероятно, эти моллюски в области своего постоянного распространения живут на дне среди обширных золотых россыпей... но, — говорил зоолог, — это золото по каким-либо причинам оказалось здесь сильно растворенным в морской воде и в таком виде перешло в кровь животного...

— Как же это происходит? — продолжал Цой, заражаясь волнением Марата. — Соли различных элементов легко проникают через тонкую оболочку водных организмов и соединяются там с органическими веществами. При этом они переходят в коллоидальную форму и вследствие этого теряют уже способность выйти обратно в окружающую воду. Организм задерживает в себе эти элементы, используя их для питания, построения скелета раковины, а иногда и неизвестно еще для каких именно надобностей. Вот я и подумал...

— Ура! Я понял! Понял, черт меня возьми! — закричал Марат, срываясь с места. — Замечательно! Гениально! Эти проклятые моллюски высасывают из морской воды золото!.. Мы их заставим высасывать это золото для нас! Мы их превратим в фабрики золота! В советские фабрики золота! Цой! Цой, ты должен продолжать работу! Это гениальная идея! Ты не имеешь права бросать ее! Это необходимо нашей стране!»

Как известно, «морская золотая лихорадка» к позитивным результатам не привела, а выражение «добыча золота из морской воды» стало использоваться в переносном смысле для определения различного рода беспочвенного прожектерства. Однако полному забвению идея никогда не предавалась, и усилиями многочисленных групп энтузиастов ее разработка продолжается и по сей день.

В 1895 г. Леверсидж, проанализировавший содержание золота в золе морских водорослей, обнаружил довольно высокое его содержание — 1 г на 1 т золы. Последующие исследования дали заметно более низкие значения, тем не менее, по мнению В. И. Вернадского, на долю различного рода «живого вещества» приходится более половины золота, содержащегося в Мировом океане. В канун первой мировой войны было предложено несколько проектов учреждения подводных плантаций, на которых бы выращивались «золотоносные» водоросли. Ни один из них, впрочем, так и не дождался реализации.

Между тем интересы золотоискателей переметнулись в сторону растений — обитателей суши.

Наиболее систематические и квалифицированные исследования в этой области были выполнены группой проф. Б. Немеца в Чехословакии еще в 30-х годах. Исследуя состав золы различных сортов кукурузы, И. Бабичка и Б. Немец обнаружили в остатке, не растворяющемся в соляной кислоте, микроскопических размеров пластинки и нити — оказавшиеся при ближайшем рассмотрении частицами золота! (Помните — трактат Пэймела?): В отличие от многих своих предшественников — авторов столь же сенсационных, сколь и сомнительных исследований — И. Бабичка и Б. Немец не спешили с выводами. Они вновь и вновь повторяли серии тщательных и разнообразных анализов. Более того, не доверяя себе, они отправили образцы для анализа многим специалистам, в том числе и советским — В. И. Вернадскому и А. П. Виноградову. Все заключения были одинаковыми: в золе зерен словацкой кукурузы содержится золото, причем в заметных количествах — около 1 г на тонну золы. Как несколько позднее показал Барвиш, еще более значительным оказалось его содержание в золе сосновых шишек — от 5,5 до 11 г на тонну золы; интересно, что в золе хвои и древесины тех же деревьев замечены лишь следы благородного металла. Сходная зависимость выявилась при обследовании золы различных

органов пихты, хотя некоторые другие растения, произраставшие в аналогичных условиях, например вереск, практически не содержали золота. Отметим, что описанные результаты получены на растениях, выросших на довольно необычном месте — на горных выработках (отвалах): возможно, в таком грунте содержание золота выше по сравнению с естественными почвами.

Заговорив о соотношении содержания золота в почве и растении, мы подошли ко второй важной области прикладного использования накопительных свойств растений — к так называемым фитогеохимическим методам. Повышенное содержание многих элементов в почвах (например, цинка, меди, магния) приводит к резкому увеличению их содержания в растениях. Анализ золы растений-концентраторов позволяет не только осуществлять выделение биогеохимических провинций, но и в ряде случаев предсказать наличие запасов различных полезных ископаемых.

Часто можно обойтись и без химического анализа, ориентируясь только по степени распространенности некоторых растений, имеющих «склонность» к тем или иным элементам.

В прошлом столетии крестьяне искали мергель в местах обильного произрастания мать-и-мачехи и вьюнка, предпочитающих почву, богатую кальцием. Очень любопытно в этой связи вспомнить историю, произошедшую во Франции, в окрестностях Орлеана. Ботаники обратили внимание, что в некоей местности, почва которой бедна кальцием, на узкой полосе правильной формы обильно растет вьюнок. При раскопках на этом месте была обнаружена построенная римлянами дорога, вымощенная известняком.

Некоторые виды лебеды растут только на почве, богатой солью, — на морском побережье и в местностях, где соляной раствор из глубины поступает в верхние слои почвы. Геологи пользуются этим обстоятельством при поисках солевых месторождений и месторождений нефти, часто залегающих под солевыми пластами. Опыт применения фитогеохимического метода для поиска месторождений золота, редкометаллических руд, кобальта, сульфидов и других полезных ископаемых имеется в СССР; в США он использовался при поиске урановых руд, в Финляндии — при разведке никеля, кобальта, хрома.

Интересно отметить, что фитогеохимический метод, история которого восходит еще к античным временам, в последние десятилетия переживает фазу энергичного развития и, возможно, в недалеком будущем займет одно из ведущих мест в геологоразведке.

К аналогичному приему прибегают для контроля радиоактивности Мирового океана. В этом случае растениями-накопителями служат водоросли, а метод носит название радиоальгологического анализа (Algae — водоросли). Выявление многих продуктов ядерного распада, в частности некоторых радиоактивных изотопов циркония, цезия, рутения, иттрия, тория, возможно главным образом на основе этого метода. Правда, если уж говорить о способности растений концентрировать продукты ядерного распада, следовало бы упомянуть и многократные газетные сообщения периода интенсивного проведения атмосферных ядерных испытаний об обнаружении опасно высоких уровней радиоактивности овощей, зерна, молока.

Вот какую историю рассказывают люди, имевшие отношение к знаменитой «Миссии Алсос» — группе, действовавшей при американском экспедиционном корпусе в Европе во время второй мировой войны; ей был поручен сбор информации о немецких исследованиях в области ядерного оружия. В различных вариантах изложения этой истории имеются довольно заметные разногласия, но интересующие нас детали в основном совпадают; по крайней мере, факты, которые мы хотим привести, подтверждаются столь авторитетными свидетелями, как профессор Годдсмит — научный руководитель «Миссии Алсос» и фундаментальное издание «Нахрихтен аус Хеми унд Техник».

Говорят, что, когда весной 1945 г. американская армия вышла к Рейну, было решено взять пробы воды из этой реки для обследования на радиоактивность. Дело в том, что все важнейшие немецкие ядерные научные центры находились в бассейне этой реки, и по результатам этого анализа можно было бы судить о степени развития исследований. К пробам воды из Рейна, направляемым для анализа в некий исследовательский институт в США, посылавшие их ученые приложили несколько бутылок рейнского вина — подарок для своих коллег на родине. Заключение института гласило: «Вода из Рейна не содержит следов радиоактивных элементов, но их присутствие обнаружено в рейнском вине. Просим прислать большую партию для тщательного обследования».

Очень странный факт

Итак, способность растений накапливать в значительных концентрациях многие ионы, рассеянные в окружающей среде, есть факт не только удивительный, но также полезный и вселяющий всякие интересные надежды. Обратимся теперь к вопросу о причинах или способах его возникновения. На первый взгляд кажется — и так казалось, в частности, ботаникам на протяжении столетий, — что ничего загадочного в этом нет. В самом деле, растение «прокачивает» через себя — испаряя листьями — десятки литров воды и все растворенные в ней неиспаряющиеся соли могут остаться в растении.

Однако уже в конце XVIII — начале XIX в. ботаники задумались над естественным вопросом: если все обстоит именно так, почему же всегда наблюдается большая разница между химическим составом почвенного раствора и растительной золы? Почему одни вещества (тот же калий) представлены в растительной золе в большей пропорции, чем в почвенном растворе, а другие (натрий) — в меньшей? А если еще подсчитать количество воды, испаряемой растением за всю жизнь (к началу XIX в. ботаники научились делать это довольно точно), то окажется, что содержание многих веществ в соответствующем количестве почвенного раствора намного меньше, чем в золе растения.

При тщательном анализе фактов выявляются дополнительные проблемы. В предыдущей главе шла речь о том, что самопроизвольное перемещение вещества в однородной среде — диффузия — может осуществляться только из области высокой его концентрации в область низкой концентрации, но ни в коем случае не наоборот.

Попытаемся аналогичным образом обосновать и другое утверждение, крайне важное для дальнейшего изложения: создание пространственной неравномерности концентраций требует затраты энергии. Вернемся к рис. 14, а. Заменим воображаемую плоскость внутри сосуда, разделяющую области с низкой и высокой концентрацией газа, материальной подвижной стенкой — поршнем (рис. 17). Рассуждая так же, как и в первом случае, мы приходим к выводу, что справа на поршень обрушится большее число ударов молекул, чем слева, и он начнет перемещаться влево; попросту говоря — в правой части сосуда большее давление. Поршень будет перемещаться до тех пор, пока по

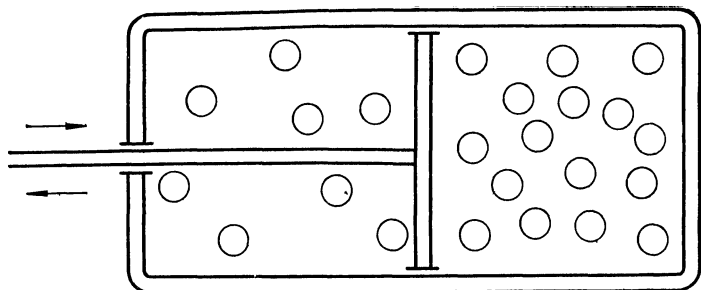


Рис. 17. Создание неравномерности концентраций требует затраты энергии

обе стороны не уравниются концентрации (а тем самым и давления), и совершит некоторую работу. Если же нам захочется восстановить первоначальное положение (концентрация газа по обе стороны поршня неодинакова), нам придется произвести ту же работу, то есть создание пространственной неравномерности концентраций требует затраты энергии.

К середине прошлого века рассуждения подобного рода стали общедоступными и на некоторое время поставили ботаников в тупик. Однако скоро было найдено весьма простое объяснение: поглощаемые растением вещества химически связываются внутри растения.

Приведем еще один отрывок из книги К. А. Тимирязева «Жизнь растения»: «Посмотрим теперь, как будут относиться растительные клеточки к веществам, растворенным в почвенной воде. Возьмем несколько приборов, состоящих из продолговатых мешков из... коллодиума, приклеенных к оконечности ламповых стекол (рис. 18, а). Положим, что эти коллоидальные мешки будут нам представлять корневые клеточки, посредством которых растение приходит в прикосновение с питательными веществами, находящимися в почве. Растение, как мы знаем на основании его элементарного состава, нуждается, между прочим, и в солях железа; мы выбираем их для примера, так как они представляют очень наглядные реакции, по которым легко усмотреть в растворе ничтожные их следы. Вот, например, в этом стакане у меня находится вода, в которую я прилил несколько капель железной соли. Прибавляю немного другой жидкости (раствора *таннина*), и бесцветный, как вода, раствор делается черным, как чер-

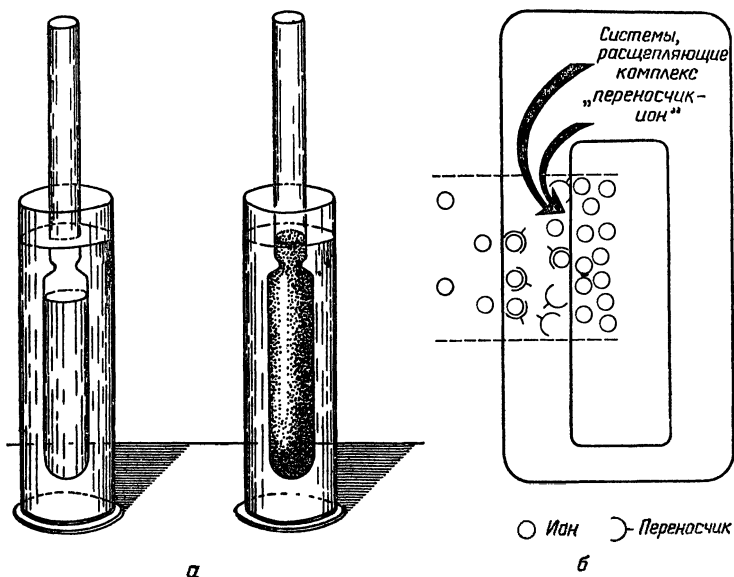


Рис. 18. Модели поглотительной клетки растений: опыт К. А. Тимирязева (а) и современная модель «активного транспорта» (б)

пила, и даже нельзя сказать — как чернила, потому что это сами чернила и есть*. Погружаем коллоидальный мешочек, наполненный водой, в сосуд с водой же, приливаем в сосуд железной соли, а в мешок — танина; через минуту внутри мешка, около стенок, показывается сероватый оттенок, а через несколько минут вся жидкость в мешке превращается в чернила. Итак, мы видим, что железная соль сама проникает в нашу клеточку, и мы знаем, что это будет продолжаться до тех пор, пока в клеточке не окажется такой же крепкий раствор соли, как в наружном сосуде, потому что только тогда в клеточку будет каждую минуту входить столько же частиц, сколько их будет выходить, — одним словом, установится равновесие. Но рождается вопрос, может ли быть достигнуто равновесие в нашем примере? Очевидно, нет: как

* Многим читателям приходилось, наверное, встречать на старых книгах надписи, сделанные черными чернилами. Они изготавливались из богатых танином наростов на листьях дуба, и были столь же повсеместно распространены, как в наши дни — фиолетовые (ализариновые) чернила. — *Прим. авт.*

только наша железная соль попала в клеточку, она образовала там соединение с таннином, которое мы для простоты будем называть чернилами; там есть чернила, но нет более железной соли, а если нет железной соли, то новое количество ее перейдет из наружного сосуда; это количество вновь превратится в чернила, и так далее, и так далее. Если только в мешке достаточно таннина, то равновесие никогда не будет достигнуто, а железная соль будет устремляться непрерывным током в нашу клеточку. Таким образом, стоит только взять коллоидальный мешок с раствором таннина и погрузить его в сосуд с раствором железной соли для того, чтобы извлечь из этого раствора всю соль, перенести ее во внутренность мешка. Оставим этот прибор на несколько часов или дней, и тогда в наружном сосуде не найдем более железной соли: наша искусственная клеточка съест, высосет ее начисто».

Сделаем со своей стороны к этому наглядному и убедительному объяснению два замечания. Первое призвано прокомментировать тимирязевский опыт в термодинамических терминах: ведь только что мы пришли к выводу, что для «изгнания» ионов железа из сосуда и их концентрации в коллодиевом мешке необходима затрата энергии. Откуда же берется в нашем случае энергия, «питающая» этот процесс?

Ответ на этот вопрос прост: это энергия химической реакции образования комплекса железа с таннином.

Конечно, обратный выход ионов железа из коллодиевого мешочка и равномерное их распределение в системе «сосуд — коллодиевый мешочек» привело бы к выделению некоторого количества энергии, значительно меньшего, однако, чем суммарная энергия разрыва связей всех ионов железа с молекулами таннина.

Таким образом, наконец, мы получаем принципиальное объяснение характера процесса поглощения растительной клеткой солей из окружающего раствора, удовлетворяющее как экспериментальным фактам, установленным ботаниками, так и общим физико-химическим принципам.

Однако тут же подчеркнем, что это касается только взаимодействия между клеткой и наружным раствором. Ибо — и в этом суть второго замечания, которое мы обещали сделать по поводу тимирязевского опыта, — аналогия между коллодиевым мешком с таннином и поглоща-

ющей растительной клеткой сохраняет силу лишь в наиболее близких к поверхности слоях клетки. В цитоплазме же и вакуоли поглощенные ионы в подавляющем своем большинстве находятся в свободном, несвязанном состоянии. Этот факт может быть установлен экспериментально многими способами, простейшим из которых является анализ вакуолярной жидкости, которую можно выдавить из любой растительной ткани.

Во времена Тимирязева этому обстоятельству не придавалось особого значения; во всяком случае, принципы организации процесса поглощения ионов клеткой доказывались на основе описанного опыта. Между тем, самые интересные детали механизма поступления минеральных веществ в клетку до сих пор еще не получили полного объяснения...

Давайте снова посмотрим на схематическое изображение поглотительной клетки растения, приведенное на рис. 12. Если какие-то компоненты ее поверхностного образования — плазмалеммы — обладают способностью химически связывать ионы, находящиеся во внешней среде, то, само собой разумеется, в результате столь же ограничивается возможность ионов перемещаться вовнутрь клетки, в цитоплазму и далее в вакуоль, сколь и возможность вернуться во внешнюю среду.

Следовательно, одним только связыванием ионов внутри клетки объяснить процесс их накопления в клеточном соке нельзя. Более того, для «отрыва» их от мест связывания и переноса в вакуоль, где они, напоминаем, находятся в свободном состоянии, необходима затрата энергии. (Это легко показать рассуждением, обратным приведенному выше). Иными словами, процесс переноса ионов из области низкой концентрации (наружный раствор) в область высокой концентрации (вакуоль) неминуемо должен, как мы уже говорили в начале раздела, сопровождаться затратой энергии. Откуда же она берется?

Детально аргументированный ответ на этот вопрос в настоящее время просто невозможен. Не хватает однозначных фактов, нет прямого эксперимента, однако есть вполне правдоподобные гипотезы, имеющие косвенное подтверждение.

Начнем объяснение с напоминания о том, что во всякой живой клетке протекают основные процессы обмена веществ: в частности, она дышит, ее цитоплазма чувствительна к различного рода внешним раздражениям, ей

присуще механическое движение, о чем уже упоминалось выше.

В наиболее общем понимании процесс дыхания есть не что иное, как высвобождение энергии в результате окисления определенных типов питательных веществ, иначе — в результате их сжигания. Так что, если говорить о чисто энергетической стороне проблемы, все обстоит просто: в каждой живой клетке в процессе дыхания выделяется некоторое количество энергии — количество, намного превосходящее потребности механизмов «накачивания» ионов в клетку.

Биохимики давно открыли и подробно описали множество процессов, происходящих в клетке, в которых энергия сгорания «биологического топлива» (мы умышленно уклоняемся от уточнения, какого именно) с помощью ферментов — особых биологических катализаторов, контролирующих почти все химические превращения в клетке, — используется для осуществления реакций, требующих затраты энергии.

В частном случае это могут быть ферменты (точнее, системы ферментов), использующие энергию дыхания для разрушения комплексов, образуемых ионами с теми агентами, которые путем связывания извлекают их из наружной среды.

Для того чтобы развить тимиразевскую модель поглощительной растительной клетки до современного уровня, необходимо внутрь коллодиевого мешочка поместить еще один. Пространство между ними по-прежнему заполним раствором таннина, внутренний мешочек — водой. На его наружной поверхности поместим ферментные системы, разлагающие (за счет энергии, высвобождающейся при дыхании, — значит, рядом нужны и «дыхательные системы») комплекс таннина с железом. При достаточно интенсивной работе этих систем и высокой концентрации комплекса железа с таннином в пространстве между двумя мембранами во внутреннем мешочке со временем образуется более высокая концентрация ионов железа, чем в среде, в которую погружена наша «клетка». Это видно из рис. 18, б: у внутренней стенки клетки — «вакуоли», комплекс таннин — железо принудительно разрушается, в результате чего концентрация ионов железа в этом слое весьма высока — выше, чем внутри меньшего мешочка. В силу того что через мембрану могут проходить только ионы железа, а не молекулы таннина, концентрация

последнего будет всегда несколько выше концентрации железа. Диффузия свободной молекулы таннина в направлении наружной мембраны приведет к связыванию ее со свободным ионом железа, протиффундировавшим извне, и т. д.

В этой модели учтены основные представления о механизме «ионных насосов» растительной клетки в том виде, в каком она сложилась в течение последнего десятилетия. Остается добавить, что данный процесс получил название «активного транспорта» и ранг одной из самых животрепещущих проблем современной биофизики. Ибо, хотя мы и в состоянии объяснить этот процесс в принципе, мы не можем сказать почти ничего конкретного о тех молекулярных механизмах, которые лежат в его основе.

И если К. А. Тимирязев описывал свой опыт с вполне конкретными подробностями, поскольку он демонстрировался во время его лекций, то наш эксперимент может рассматриваться лишь как эксперимент мысленный. Не в состоянии пока что химики реализовать те необходимые для успеха опыта системы, которые использовали бы на разложение комплекса таннин-железо энергию, выделяющуюся при сжигании внутреннего «топлива». Потому-то до сих пор не созданы промышленные установки, работающие по принципу клеточных мембран и разделяющие смеси химических соединений на основные компоненты. Инженерам очень хотелось бы заполучить такие установки, ведь большинство процессов химической технологии в значительной части состоит из последовательных приемов разделения. Грубо говоря, гораздо проще осуществить саму химическую реакцию, чем разделить образовавшиеся в ее результате продукты. Что и говорить — не было бы цены искусственным мембранам, работающим по принципу мембран растительных клеток. Одно плохо — мы до сих пор толком не знаем, как они устроены.

Глава 3. КОЕ-ЧТО О РАСТЕНИЯХ-ХИЩНИКАХ

Часто, говоря о некоем периоде бездеятельного, однообразного существования, мы используем выражение: «Я вел растительный образ жизни». Жалуясь на суетность человеческого бытия, один из персонажей оперетты Оффенбаха «Прекрасная Елена» постоянно восклицает: «Если бы люди были, как цветы!». Но вот оказывается, что в семье растений — созданий скромных, непритязательных, покладистых и спокойных — есть отдельные (так и хочется добавить — совершенно нетипичные) представители, с полным основанием называемые хищниками. Более близкое знакомство с некоторыми из них, несомненно, полезно для нашей темы. Правда, специализированных «электрохищников», подобных знаменитым электрическому скату и электрическому угрю, поражающих свои жертвы сильным электрическим разрядом, в растительном царстве нет. Однако, как мы сумеем убедиться впоследствии, электрические явления, происходящие в организме растений-хищников, имеют самое прямое отношение к их агрессивному поведению и столь странному для растения образу жизни.

Орхидея, пощади!

Еще в начале прошлого века европейские путешественники, посещавшие различные тропические страны, сообщали о страшных растениях-людоедах. Они никогда не растут группами — только поодиночке. Обычно местом их обитания являются влажные и болотистые тропические джунгли, но некоторые их разновидности встречаются и в пустыне.

Основная причина, побуждающая растения к хищническому образу жизни,— погоня за высококонцентрированной пищей. В условиях влажного тропического леса борьба — в буквальном смысле — за место под солнцем в первую очередь определяется доступностью питательных веществ. Для того чтобы пробиться сквозь густые кроны могучих зеленых гигантов, нужно усиленное питание — за счет легкомысленной юной обезьянки, вздумавшей порезвиться на упругих ветвях, несущих глянцеватые темно-зеленые листья, за счет рассеянной птицы, присевшей отдохнуть где придется, а то и за счет неосторожного матроса с корвета английского королевского флота.

Заметим, что именно английские моряки и путешественники более всего преуспевали в открытии и описании человекоядных растений тропиков. Сначала их обнаружили в Африке, потом — на островах Полинезии, некоторое время спустя — в джунглях Амазонки.

Один из путешественников, чудом уцелевший после встречи с деревом-кровососом в саванне Южной Африки, сумел со многими подробностями описать форму его листьев, строение кроны и, разумеется, его воздушных корней — присосков. Эти описания в основных деталях совпадали с рассказами многих других очевидцев, хотя их сообщения о встрече со странными растениями поступали из совершенно иных уголков земного шара.

Правда, рассказы путешественников обычно были до такой степени перенасыщены ужасными подробностями, что вызывали, мягко говоря, недоверие. Но возвращались из дальних странствий все новые и новые очевидцы, и их рассказы вроде бы не оставляли никаких сомнений: да, растения-людоеды существуют.

Появилась даже идея выращивать их в оранжерейных условиях в Европе, естественно, с соблюдением необходимых мер предосторожности. Потому что если их не соблюдать...

Вот что произошло с неким мистером Уэдербарном, купившим по случаю корневище неизвестной тропической орхидеи и выростившим ее в своей оранжерее:

«Едва войдя в маленькое, крытое стеклом помещение, он тот час понял, что бутон распустился... В воздухе носился новый аромат — сильный, необычайно сладкий, заглушивший все остальные запахи в этой душной, наполненной испарениями оранжерее. Уэдербарн поспешил

к орхидее, и — о, радость! — на свисающих зеленых ветвях качались три крупных белых цветка, источавшие этот одуряющий аромат. Уэдербэрн замер от восторга.

Цветы были белые, с золотисто-оранжевыми полосками на лепестках; тяжелый околоцветник прогнулся, и его чудесный голубоватый пурпур* смешивался с золотом лепестков. Уэдербэрн тотчас понял, что это совершенно новый вид. Но какой нестерпимый запах! Как душно в оранжерее! Цветы поплыли у него перед глазами.

Надо проверить, не слишком ли высока температура. Он шагнул к термометру. Внезапно все закачалось. Кирпичный пол поднялся и опустился. Белые цветы, зеленые листья, вся оранжерея — все накренилось, потом подскочило вверх.

В половине пятого, согласно раз и навсегда заведенному порядку, экономка приготовила чай. Но Уэдербэрн к столу не явился.

...Она направилась прямо к оранжерее, открыла дверь и окликнула его. Ответа не последовало. Она заметила, что воздух в оранжерее очень спертый и насыщен крепким ароматом. И тут она увидела что-то, лежащее на кирпичном полу у горячих труб батареи.

С минуту она стояла неподвижно.

Он лежал навзничь у подножия странной орхидеи. Похожие на щупальца воздушные корешки теперь не висели свободно в воздухе, сблизившись, они образовали как бы клубок серой веревки, концы которой тесно охватили его подбородок, шею и руки.

Сперва она не поняла. Но тут же увидела под одним из хищных щупалец тонкую струйку крови.

Крикнув нечто нечленораздельное, она бросилась к нему и попробовала отодрать похожие на пиявки присоски. Она сломала несколько щупалец, из них закапал красный сок.

От ошеломляющего запаха цветов у нее начала кружиться голова. Как они вцепились в него! Она тянула тугие веревки, а все вокруг плыло, как в тумане. Она чувствовала, что теряет сознание, и понимала, что этого нельзя допустить. Оставив Уэдербэрна, она поспешно открыла ближайшую дверь, вдохнула свежий воздух, и тут ее осенила блестящая мысль. Схватив цветочный горшок, она швырнула его в стекло в конце оранжереи.

* Бывает, оказывается, и такой!

Затем с новыми силами принялась тащить неподвижное тело Уэдербэрна. Горшок со страшной орхидеей свалился на пол. С мрачным упорством растение все еще цеплялось за свою жертву. Надрываясь, она тащила к выходу тело вместе с орхидеей. Затем ей пришлось в голову отрывать присосавшиеся корешки по одному, и уже через минуту Уэдербэрн был свободен. Он был бледен, как полотно, кровь текла из многочисленных круглых ранок...»

Какая жуткая история!

И это еще хорошо, что все, о чем в ней идет речь, — неправда. Не было никакого мистера Уэдербэрна, а следовательно, и не растил он в своей оранжерее столь ужасное растение. Это лишь отрывок из рассказа Герберта Уэллса «Цветение странной орхидеи».

Более того, вообще нет на свете никаких растений-людоедов. Выдумкой чистейшей воды оказались сообщения и храбрых матросов с королевских корветов и бесстрашных английских землепроходцев, и эрудированных путешественников-натуралистов. Но что удивительно, — сочиняли они очень согласованно, с совпадением многих деталей и при этом совершенно без всякого предварительного сговора. Это и способствовало живучести ужасной легенды, отголоски которой проникали в виде «правдивых сообщений» в печать и в середине нашего века. Видно, заложен в каждом из нас некий подсознательный стереотип — представление о растении-хищнике, и соответствует он (конечно, с некоторыми отклонениями) тому образу, который возникал в сознании незнакомых друг другу бывалых людей.

Но ботаника — наука эмпирическая, и одних рассказов для нее недостаточно. Мало-помалу ботаники начали убеждаться, что их попросту водят за нос, и после тщательной проверки пришли к выводу: никаких растений-людоедов нет.

Однако растения-хищники, как известно, в природе существуют. Им, конечно, не под силу справиться не только с мистером Уэдербэрном, но даже с мышонком; их жертвы — чаще всего насекомые. Если говорить о флоре средней полосы, прежде всего вспоминается росянка, знакомая большинству из нас по школьному учебнику ботаники.

Иногда в тех же учебниках упоминается еще и венерина мухоловка, изредка встречающаяся на болотах штата Северная Каролина в США — и нигде более. Между тем

именно она была первым растением-хищником, с полной достоверностью описанным профессиональным ботаником. В 1769 г. английский исследователь Джон Эллис сообщил (в письме знаменитому Карлу Линнею) об этом странном растении. И хотя этот факт оставался неопубликованным долгие годы, именно 1769 г. считается началом вполне научного исследования немногочисленной, но крайне необычной группы растений, вокруг которой впоследствии развернулось столько жарких споров естествоиспытателей.

К концу XVIII в. было известно несколько видов насекомоядных растений. Вслед за сообщением Джона Эллиса появилось исследование немецкого натуралиста Рета, описавшего ловлю зазевавшихся или чересчур любопытных насекомых росянкой (1782 г.). В 1791 г. Бартрам открывает еще один род насекомоядных растений — саррацении.

Говорят, что способность удивляться — важнейшее качество естествоиспытателя. Взгляните, как эмоционально писал по поводу насекомоядных растений немецкий ботаник Фердинанд Кон: «Кажется, будто мы находимся в мире, где все происходит наоборот, где заяц преследует охотника и ягненок пожирает волка. Мы считаем вполне нормальным, когда безоружное растение молчаливо переносит всякого рода обиды и опустошения со стороны животных, особенно со стороны насекомых, от гусеницы до червячка, от саранчи до жука. А тут перед нами является растение, одно из самых нежных и невидных, которое храбро вступает в борьбу в качестве добровольца со своими наследственными врагами и, заманив свою жертву в засаду, не только убивает ее с жестокостью людоеда, но тут же пожирает ее».

Приглядимся к типичному представителю таких растений — к росянке. Если вам приходилось забредать на торфяное болото, вы могли натолкнуться на это растение. Небольшая розеточка странных покрытых волосками булавовидных листьев; в период ее цветения можно увидеть длинные, хиловатые, крайне скромные цветочки (рис. 19, а).

Лист росянки напоминает щетку для массажа головы. По всей его поверхности торчат щетинки, увенчанные шарообразными вздутиями (рис. 19, б, в). На кончике каждой такой щетинки выделяется капля жидкости. Именно поэтому, кстати сказать, и назвали росянку росянкой.

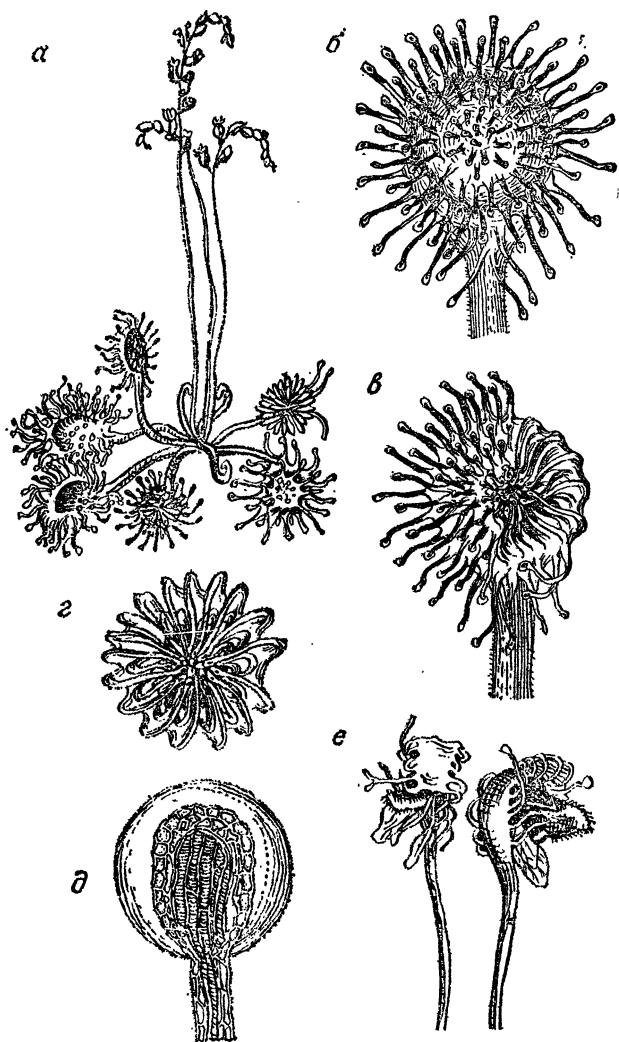


Рис. 19. Росянка: *a* — общий вид росянки круглолистной; *б* — раскрытый лист росянки; *в* — частично закрытый лист; *г* — полностью закрытый лист; *д* — головка щетинки-щупальца; *е* — лист росянки длиннолистной, поймавшей большую муху

Щетинки окрашены в ярко-красный цвет; капельки вязковатого, чрезвычайно аппетитного выделения источают сладостный аромат — словом, редкое насекомое избегает искушения тщательно обследовать такое растение.

Садится растяпа-мушка на листочек, прилипает лапками к клейкому соку щетинок и пытается освободиться. Но не тут-то было! Щетинки вдруг начинают загибаться вовнутрь листа, причем так, что насекомое как раз и оказывается в центре, к которому они склоняются (рис. 19, *г*).

Надо отметить, что движения росянки при поимке жертвы крайне экономны. Если попало небольшое насекомое — его прихватывают лишь несколько щупалец-щетинки; чуть побольше — участвует уже половина листа (рис. 19, *в*). В особо серьезных случаях (рис. 19, *е*) изгибаются не только щупальца, но и сама листовая пластинка, как бы обертывая насекомое.

Все эти разумные последовательные движения росянка совершает под действием раздражения — трепыханий и толчков жертвы. Интересно, что реагирует она только на систематические и энергичные толчки и подергивания: если же щетинки случайно задевают сухой стебелек травы, колеблющейся на ветру, — никакой реакции не последует.

Впрочем, поимка жертвы — это только первый этап. Как только насекомое прочно захвачено растением, лист начинает обильно выделять муравьиную кислоту и пищеварительные ферменты.

Ферменты, как мы уже упоминали, — это особые биологические катализаторы. Значительная часть ферментов желудка животных предназначена для разложения белков — полимерных молекул, образованных соединенными в цепочку аминокислотами, — на элементарные звенья — аминокислоты. Эта реакция интенсивнее протекает в кислой среде.

Протеолитические (т. е. расщепляющие белки) ферменты листьев росянки сходны с желудочными. Их появление сопровождается обильным выделением муравьиной кислоты. С одной стороны, это способствует, как мы сказали, пищеварительной деятельности ферментов, с другой — быстрее умертвляет насекомое.

Тело насекомого переводится, таким образом, в растворимое состояние и всасывается поверхностью листа. «Несъедобные» остатки через некоторое время освобожда-

ются — росянка расслабляет свою цепкую хватку. На кончиках щупалец-щетинок опять появляются капельки ароматного нектара. Лист готов принять очередную жертву.

Отметим еще одну любопытную деталь, характеризующую коварство росянки. На болотах росянка зачастую растет вперемешку с белозором, желтоголовые щетинки на медоносном аппарате которого очень напоминают щупальца росянки. Насекомые, привлекаемые яркой окраской этих щетинок, находят, однако, очень мало доброкачественного нектара. Но что там убогий сбор с цветка белозора по сравнению с тем, что обещает расположенное рядом растение, на котором щетинки буквально источают вязкий сироп? Скорее туда!

Додель, впервые обративший внимание на это обстоятельство, замечает, что насекомых, ставших жертвами росянки, нельзя упрекнуть в глупости или в легкомыслии.

На их месте, утверждает Додель, мы поступили бы ничуть не лучше: «Для сравнения представим себе голодного деревенского подмастерья, попавшего в незнакомый шумный город. Вот на его пути попадаетея дом с вывеской, обещающей ему бесплатную пищу. Он заходит в этот дом и действительно получает кое-какой харч, но в таких скудных количествах, что он не только не утоляет голод, но лишь чувствует еще больший аппетит. Выйдя в легком разочаровании на улицу, он видит неподалеку еще один дом, с вывеской в том же смысле, но разрисованный гораздо более богато: тут и колбаса, и сыр, и вино, и хлеб, и всякие плоды, и...

Кто из нас на месте этого голодного подмастерья удержался бы от того, чтобы войти и во второе здание? Но если, войдя туда, он вместо богатого угощения находит себе погибель, то можем ли мы сказать, что он погиб от недостатка ума?».

Что и говорить, очень хорошо, что размеры наши так велики. Будь мы величиной с муху — все вымышленные ужасы истории с мистером Уэдербэрном не шли бы ни в какое сравнение с тем, что могло бы постигнуть любого из нас на листке росянки.

Мы уже упоминали о венериной мухоловке (рис. 20, а). Почему венерина? По-латыни она называется *Dionaea muscipula*. *Muscipula* — мухоловка, а *Dionaea* — одно из многочисленных имен богини любви Венеры. Венера была дочерью Зевса и Дионы — отсюда это вариант имени. Проанализировав эти обстоятельства, известный советский

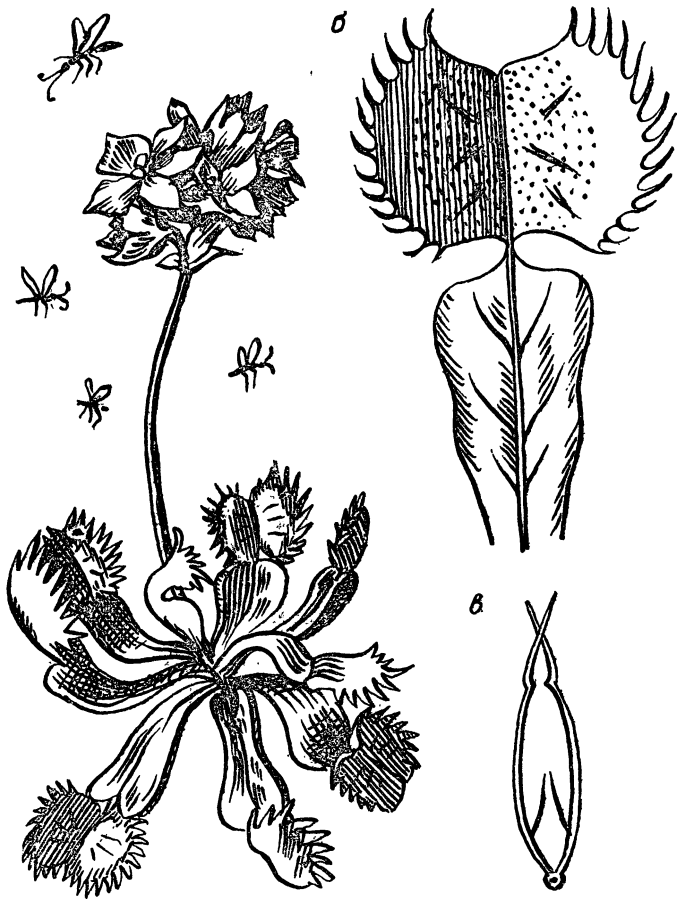


Рис. 20. Венерина мухоловка: а — общий вид; б — раскрытый ловчий лист; в — поперечный срез листа в захлопнутом состоянии

ботаник В. И. Талиев приходит к выводу: «Название, очевидно, дано по вольной ассоциации идей (улавливание жертвы)».

Венерина мухоловка — довольно близкий родич росянки, и повадки у нее примерно те же. Лист венериной мухоловки оканчивается утолщенной округлой пластинкой, края которой усажены острыми зубцами. На поверхности листа расположены чувствительные щетинки. По

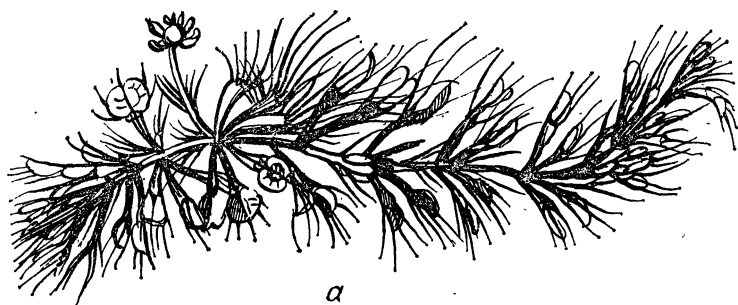
скорости реакции венерина мухоловка, по-видимому, чемпион растительного царства — стоит насекомому присесть на ее листочек, как снабженные зубьями половинки почти мгновенно схлопываются (рис. 20, б, в).

По своему строению лист венериной мухоловки напоминает капкан. Когда две половинки его смыкаются, зубья одной половинки заходят в пазы другой. По принципу действия это скорее западня, чем капкан. В начальной, быстрой фазе движения происходит неполное смыкание половинок; если насекомое не велико и не лишено проворства, у него есть еще время выскочить наружу через зазор между зубцами. Если же жертве этого сделать не удастся, края листа медленно сдвигаются до полного смыкания. Процесс пищеварения, аналогичный тому, который происходит у росянки, начинается сразу, до полного закрытия листа-ловушки.

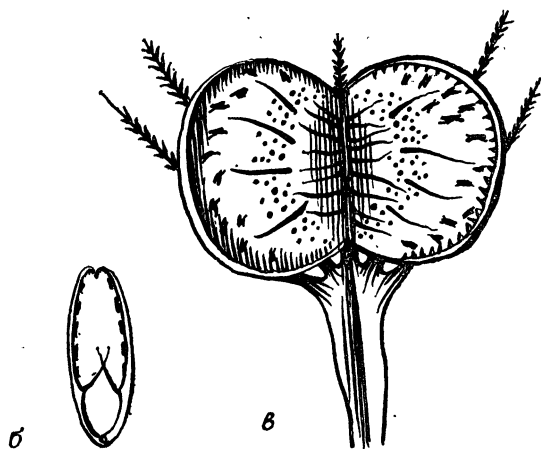
Водяной сородич росянки и венериной мухоловки — альдрованда — гроза мелких рачков. Ее листья, сильно отличающиеся по внешнему виду от листьев венериной мухоловки (рис. 21. а), при поимке своей жертвы срабатывают таким же образом. Слизистые выделения внутренней поверхности листа привлекают рачков, обычно плавающих стайками. Чувствительные щетинки воспринимают толчки, половинки листа сближаются и очень плотно смыкаются, образуя герметически изолированную полость (рис. 21, б, в). Постепенно вода из такого пузырька удаляется, вытесняемая газами, выделяющимися с поверхности листа, и начинается процесс пищеварения. В отличие от листьев других насекомоядных растений, лист альдрованды — ловушка одноразового действия; после «срабатывания» он вскоре отмирает.

Иначе «охотится» водное растение утрикулярия (рис. 22, а). Внешне некоторые виды утрикулярии имеют сходство с альдровандой; на ее побегах можно заметить такие же пузырьки — ловушки для различных насекомых и ракообразных, но ловушки принципиально другой конструкции.

Пузырек утрикулярии представляет собой мешочек с узким входным отверстием, закрывающимся с помощью особого клапана (рис. 22, б, в). Внутренняя поверхность пузырька устлана железками, интенсивно отсасывающими воду. Упругие стенки мешочка при этом деформируются, так что при открывании клапана пузырек с силой всасывает воду. Открытие же клапана можно вызвать



a



б

в

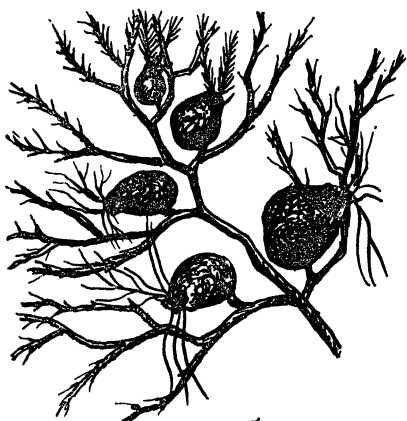
Рис. 21. Альдрованда: *a* — веточка альдрованды; *б* — поперечный срез закрытого листа; *в* — раскрытый лист

легким нажатием на волоски у входного отверстия. Мелкое насекомое, задевшее за такой волосок, всасывается вместе с водой внутрь пузырька, упругий клапан закрывается, а остальное нам уже известно. Утрикулярия — растение весьма прожорливое; иногда его добычей становятся даже мальки рыб и головастики.

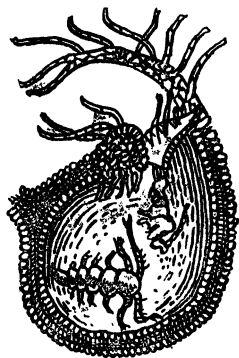
И наконец, совершенные диковинки клана насекомоядных растений — саррацении и непентесы. Ловчими органами у представителей этих родов являются листья-урны, иногда огромных размеров (до одного метра), причудливой формы (рис. 23, *a*, *б*, *в*) и фантастической расцветки. Никаких или почти никаких движений эти листья не совершают. Они привлекают насекомых окраской, а также



a



б



в

Рис. 22. Утрикулярия: *a* — общий вид; *б* — веточка с ловчими пузырьками; *в* — разрез пузырька

пахучим нектаром, выделяющимся у входных отверстий. В верхней части урны внутренняя поверхность покрыта гладкой скользкой кожицей; насекомые срываются и скользят вниз; гладкая стенка сменяется зоной волосков, направленных вниз и исключающих возможность продвижения в обратном направлении. На дне листа-сосуда — жидкость, содержащая пищеварительные ферменты (рис. 23, *г*).

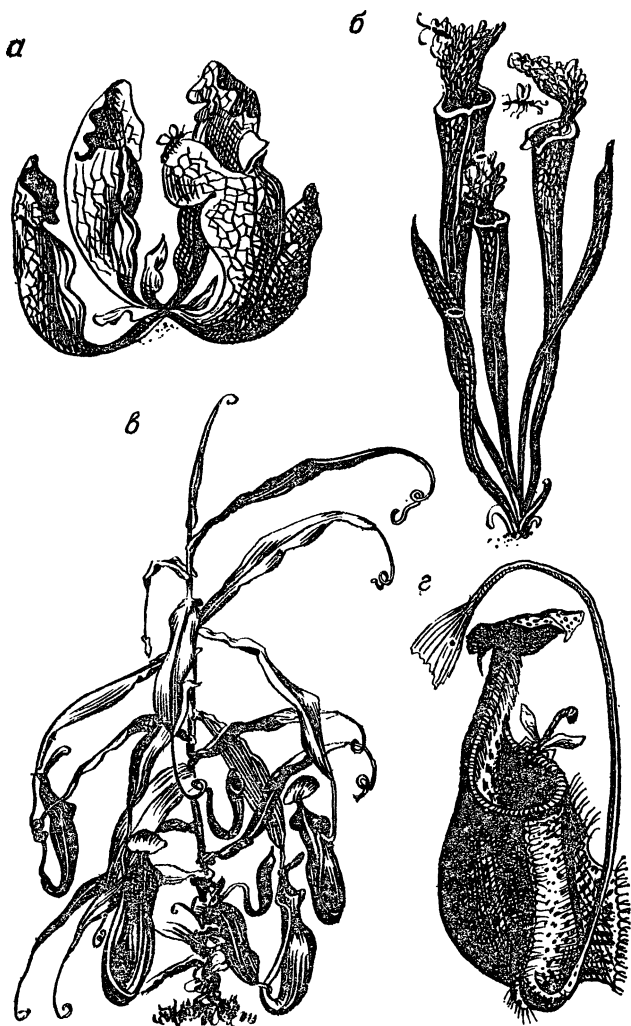


Рис. 23. Саррацении и непентесы: а — саррацения пурпурная; б — саррацения Драммиода; в — общий вид непентес; г — лист непентес с ловчим кувшинчиком

Такие листья могут свисать с дерева, лежать на земле или даже — у одного из видов непентес — находиться в земле, так что наружу выступает только входное отверстие.

Как видим, среди насекомоядных растений встречаются почти все типы орудий лова — капканы и западни, верши и «волчьи ямы». Следует упомянуть и живую липучку для мух — росолист. Листья этого растения имеют железки, выделяющие липкую и пахучую слизь (она и привлекает насекомых) и содержащие пищеварительные ферменты. Продукты переваривания прилипших насекомых поглощаются теми же железками.

Об этом растении мы вспомнили лишь к слову. Нам же интересуют, прежде всего, настоящие растения-охотники, способные совершать скоординированные «захватывающие» движения и, что особенно важно, совершать их только под действием определенных внешних раздражений. Ибо как раз эти растения явились причиной изрядного замешательства, приведшего в конце концов к нескольким замечательным открытиям.

Чарлз Дарвин и холодный разум немецких исследователей

Как мы уже говорили, к началу прошлого века существовало несколько вполне серьезных и добротных описаний случаев насекомоядности у растений. Сами по себе эти описания не вызывали у биологов каких-либо возражений, как не подлежали сомнению добросовестность и профессионализм их авторов. И все же растений-хищников временами старались не замечать, порой даже сознательно оставляли без внимания факт их открытия.

Фердинанд Кон язвительно отметил по этому поводу: «Всякая наука имеет свою кладовую, куда сносится все то, что не находит себе настоящего места в благоустроенных помещениях научного здания; в такую кладовую были свалены все удивительные растения, так как они, по-видимому, стояли в полном противоречии ко всему тому, что мы до сих пор знали о жизни растений».

Вспомним, что начало XIX в. — это период интенсивных попыток осмыслить общую структуру всего органического мира в рамках некой единой теории, годы славы блистательного Кювье и фанатичного Ламарка. И надо

признать, что дела с этой самой общей теорией и без того обстояли не очень хорошо, а тут еще растения-хищники, рушащие всю систему основных определений. Биологи-теоретики того времени стремились к категоричности в формулировках, к построению сложных словесных конструкций, легко уходя в сторону схоластики. И, конечно, растения-хищники составляли очень неудобное исключение, безжалостно искажавшее стройную теорию.

Поэтому долгое время они разделяли судьбу всех исключений такого рода — при сколько-нибудь широких обобщениях их просто не упоминали. Например, Жан-Батист Ламарк, несомненно знавший о существовании насекомоядных растений, тем не менее дал следующее определение растения: «Растения представляют собой живые, организованные тела, части которых никогда не обладают раздражимостью. Они не переваривают пищи и не способны двигаться ни под влиянием волн, ни вследствие истинной раздражимости».

Между тем ботаники-экспериментаторы продолжали интересоваться «плотоядными растениями», как их назвал в свое время Бартрам.

В 1835 г. Кортальс пополняет список насекомоядных растений несколькими видами из рода непентес. «Вестник естественных наук» за 1855 г. публикует статью профессора Московского университета К. Ф. Рулье «Растения, ловящие насекомых». В ней описаны несколько видов таких растений, имеющиеся у них приспособления для завлечения и поимки насекомых. Рулье, однако, уклоняется от каких-либо обобщений в отношении насекомоядности: «...какой смысл его — отчего и для чего оно? Лучше признаться, что мы ничего не знаем о втором, а о первом говорим, что оно зависит от особой возбуждаемости клеточной ткани растения, и приводим его в одну группу с явлениями, как складыванием листьев у мимозы и растрескиванием плода от прикосновения у недотроги, растущей под Москвою на низменных местах».

Вскоре Оже де Лясю обнаружил, что листья альдрованды под действием механического раздражения совершают хватательные движения, а несколько лет спустя Кэнби неопровержимо доказал, что поверхностные выделения листьев венеериной мухоловки обладают «пищеварительным действием».

Примерно в 1860 г. насекомоядные растения привлекли внимание Чарлза Дарвина («Происхождение видов»

вышло годом раньше). Исследование природы движений различных органов растений было основной сферой научных интересов Дарвина в последние двадцать лет его жизни.

Результаты этих исследований изложены в двух книгах — «Насекомоядные растения» и «Способность к движению у растений». Изучая движение щупалец у росянки, Дарвин работал с громадным увлечением. Он писал Лайеллю: «В настоящее время *Drosera* (росянка. — *Авт.*) интересует меня больше, чем происхождение всех видов на свете». Несколько лет спустя в письме к Аза Грею Дарвин в шутку называл росянку «удивительным растением или, скорее даже, очень умным животным». Одновременно ученый интенсивно изучает движение усиков у вьющихся растений и некоторые виды движений других органов.

Увлечение Дарвина частными проблемами физиологии растений кое-кому казалось неожиданным; в самом деле, после всеобъемлющей теории, ставшей эпохальным событием в биологии, — какие-то росянки и усики лиан!

Однако в выборе этого направления исследования Дарвин руководствовался в первую очередь логикой совершенствования созданного им эволюционного учения. Дело в том, что по укоренившимся в биологии XIX в. взглядам между двумя царствами органического мира — растительным и животным — существовала почти непреодолимая пропасть. Изучение химических и физических механизмов в процессах жизнедеятельности только начиналось; круг экспериментальных наблюдений, на основе которых могли быть созданы некие собирательные образы «типичного животного» и «типичного растения», был довольно ограничен; отсюда преувеличение разрыва, существующего между животными и растениями.

Правда, успехи в клеточной биологии, только-только сформировавшейся биохимии позволяли предположить, что примитивизм организации растительного организма по сравнению с животным — кажущийся. В значительной степени он проистекает от недостатка точного знания. «Становилось невозможным мыслить растение как «неполноценный организм», лишенный целого ряда свойств, которыми наделено активно движущееся и чувствительное животное. Искусственная грань между ними все более стиралась. Для полного торжества эволюционной теории эту грань необходимо было разрушить и потому-то

Ч. Дарвин часто подчеркивал, что ему всегда доставляла большое удовлетворение возможность «поднять растение на высшую ступень в системе живых существ». Для достижения этой цели, для «уравнения в правах» животного и растительного организмов трудно было найти лучший объект, чем некоторые представители группы насекомоядных растений...» Читая эти строки, принадлежащие перу известного советского ботаника Н. Г. Холодного и позаимствованные нами из его работы «Насекомоядные растения» *, поневоле вспоминаешь стихи С. Маршака:

Человек — хоть будь он трижды гением —
Остается мыслящим растением.
С ним в родстве деревья и трава.
Не стыдитесь этого родства.
Вам даны до вашего рождения
Сила, стойкость, жизненность растения.

Книга Дарвина о насекомоядных растениях появилась лишь в 1875 г. и тут же вызвала крайне шумную реакцию в кругах ботаников. Директор Петербургского ботанического сада Регель писал в журнале «Гартенфлора»: «Знаменитый английский ученый Дарвин выставил в новейшее время смелую гипотезу, что существуют растения, которые ловят насекомых и даже едят их, но если мы сопоставим вместе все известное, то должны будем прийти к заключению, что теория Дарвина принадлежит к числу тех теорий, над которыми всякий здравомыслящий ботаник и естествоиспытатель просто смеялся бы, если бы оно не исходило от прославленного Дарвина... Мы надеемся, что холодный разум и основательное наблюдение наших немецких исследователей скоро забросят эту теорию... в ящик научного хлама, который сами бывшие последователи таких теорий меньше всего захотят когда-либо открыть!»

Сказано, как видим, с явным намерением посылнее уязвить Дарвина. Ни о какой академической умеренности суждений нет и речи. Конечно, Регель — не бог весть какая величина в ботанике того времени, и если бы его голос был одиноким, об этом выпаде просто забыли бы. Но вот что пишет в своих «Лекциях по физиологии растений» Сакс — глава немецкой школы физиологии расте-

* Из этой работы заимствованы и многие другие сведения, использованные при написании предыдущего и этого разделов.

ний, человек, претендующий на роль столь же непререкаемого авторитета в этой области знаний, какими были Гаусс в математике и Либих в химии:

«Читатель, поверхностно знакомый с нашей литературой, будет, вероятно, несколько удивлен тем, что я ни в одной из лекций всего этого отдела (посвященного движениям органов растений вследствие раздражений. — *Авт.*) не упоминаю большой книги Дарвина «Способность к движению у растений» (1880). Но я могу только сожалеть о том, что имя Чарлза Дарвина стоит в заголовке. Опыты, которые он описывает вместе со своим сыном, поставлены без знания дела и плохо истолкованы, а то небольшое хорошее, что можно найти в книге, например в отношении общих взглядов, не ново».

Еще один видный немецкий ботаник — Визнер — почти сразу после выхода в свет работы Дарвина о движениях растений публикует книгу, специально посвященную ее критике. Исследовавший полемику Дарвина с немецкими ботаниками Н. Г. Холодный считает, что по сравнению с грубыми выпадами Сакса и Регеля Визнер придает «своим возражениям возможно более деликатную форму». Вот и пример этой деликатности: «...такая аналогия не имеет ничего общего с трезвым естествознанием... Проводя параллель между движениями растений и гораздо более сложными процессами в животном организме, мы не только ничего не выигрываем, но еще более удаляемся от нашей цели».

Обращает на себя внимание тот факт, что эта «полемика» была чрезвычайно односторонней. Отвечая Визнеру, Дарвин в очень мягкой форме отвергает его главные возражения, замечая: «Могу только сказать, что чувствую себя совершенно пораженным различием наших взглядов». И с преувеличенной скромностью завершает свой ответ: «Впрочем, мое мнение значит очень мало, и я не сомневаюсь, что Ваша книга убедит большинство ботаников в том, что я не прав в тех пунктах, по которым наши взгляды расходятся».

И все-таки — что же так возмутило современных Дарвину ботаников в его исследованиях движений у растений?

Во-первых, наиболее общий вывод: насекомоядность у растений — способность, выработавшаяся в процессе эволюции для улучшения их азотистого и минерального питания. Иными словами, насекомоядные — хищники в полном смысле этого слова; насекомые, гибнущие в их

ловушках, — жертвы не только собственной неосторожности, но и преднамеренного коварства растений-ловцов.

Это положение пытался оспорить цитировавшийся выше Регель. Согласно его наблюдениям, в опыте с подкармливанием росянки насекомыми растения развивались хуже, чем те, которые были лишены такой подкормки. Однако аналогичные опыты, поставленные Келлерманом и фон Раумером, сыном Дарвина — Френсисом и известным немецким ботаником Бюсеном, выявили совершенно обратную картину: подкармливаемые растения росянки давали в полтора-три раза больше соцветий, завязывали в два-пять раз больше коробочек, а по весу семян превосходили контрольные в два-четыре раза. Отметим, что эти результаты были получены после опубликования книги Дарвина, в которой тезис о том, что насекомоядность есть приспособление, важное для получения неких преимуществ в борьбе за существование, высказывается на основании различного рода косвенных данных.

Еще одно и крайне неприятное для стандартной ботанической идеологии второй половины XIX в. заключение, содержащееся в работах Дарвина, — это вывод о том, что растения обладают раздражимостью — способностью быстро и скоординированно реагировать на определенное внешнее воздействие, причем эта реакция может передаваться от места раздражения различным органам, более или менее от него удаленным.

Вот это-то и не нравилось оппонентам Дарвина прежде всего. Еще в XVII в. знаменитый Юнгиус сказал: «Растения не чувствуют». С тех пор этот тезис кочевал из одного курса общей философии в другой (ботаника под названием «фитологии» составляла в XVII—XVIII вв. один из разделов общей философии). Десятилетиями и даже столетиями повторялся он с кафедр университетов в Льеже и Цюрихе, Париже и Кракове. И даже в начале XIX в. о неспособности растений к раздражению говорит сам Ламарк — мы уже цитировали его определение.

Таким образом, причины, побудившие значительную группу немецких ботаников выступить с нападками на Дарвина, были бы вполне понятны, если бы его оппонентами оказались косные талмудисты и консерваторы, находящиеся в плену заскорузлых концепций прошлого. Не исключено, конечно, что попадались среди них и люди такого толка. Но мотивы, которыми руководствовались в полемике с Дарвином Сакс и его школа — исследователи

несомненно серьезные и добросовестные — были принципиально иными. Проистекали они вовсе не от консерватизма, а наоборот — от неумеренного научного модернизма.

Первые успехи применения методов точных наук в биологии, наметившиеся во второй половине прошлого века, несколько вскружили голову ботаникам. После того как на основе физико-химических представлений удалось объяснить течение ряда физиологических процессов, повсеместно ширилось убеждение, что столь же просто удастся в конце концов объяснить и те явления, которые остались неисследованными. Сама по себе такая установка содержала много ценного — она ускорила процесс избавления от различных виталических направлений, все еще сохраняющих свое влияние, и по существу была материалистической. Однако сто лет назад биологи даже приблизительно не представляли себе масштабы сложности физико-химических процессов, лежащих в основе жизнедеятельности, и, движимые скорее нетерпением, чем строгой логикой исследования, пытались все, даже самые сложные жизненные явления, объяснить с точки зрения так называемых «механических теорий». Термин «механизм», принятый в то время для определения этого направления, в русском языке был трансформирован, во избежание путаницы, в «механицизм» (сделал это, по-видимому, В. Фаусек в 1903 г.).

Считая растения организмами низшей ступени, механицисты полагали, что именно при объяснении их главных жизненных отправлений удастся с наибольшей полнотой продемонстрировать силу «механического» подхода. Поэтому иногда десятилетиями игнорировались очевидные, но не поддававшиеся чисто механическому истолкованию факты. Например, с давних пор известное ботаникам явление — стремление растущего корня изогнуться таким образом, чтобы его окончание располагалось вертикально, немецкий физиолог Гофмейстер объяснял по аналогии с изгибом тонкой размягченной восковой свечки, укрепленной за один конец горизонтально.

В области исследования движений у растений эта тенденция проявилась наиболее ярко. Считалось, что все движения происходят в результате непосредственного изменения свойств ткани под влиянием местных воздействий, то есть полностью исключалась передача раздражения между отдельными участками ткани, а тем более —

между различными органами растения. Да и использование термина «раздражение» применительно к растениям считалось некорректным. Стоит ли заимствовать из физиологии животных — существ неизмеримо более сложно организованных — слово «раздражимость» для обозначения немудреных механических явлений, имеющих место в жизни растения? Зачем понадобилось знаменитому Дарвину (кстати, неспециалисту в области физиологии растений) в простых явлениях набухания и обезвоживания растительных тканей усматривать аналогию с управляемыми реакциями животного организма? К чему эти поиски способов восприятия растениями внешних сигналов и передачи (опять неуместное слово) раздражения?

Вернемся к приводившейся выше цитате Визнера и продолжим ее. «Проводя параллель между движениями растений и гораздо более сложными процессами в животном организме, мы не только ничего не выигрываем, но еще более удаляемся от нашей цели. Нужно думать, что многие из загадочных явлений движения у растений можно свести к простым механическим процессам. А коль скоро эти формы можно объяснить естественнонаучно, т. е. механически, то будет правильнее поставить их на низшую ступень, чтобы понять представляющиеся нам аналогичными, но безусловно более сложные процессы в животном организме».

В этих словах — исчерпывающее изложение мотивов, которые побудили противников Дарвина к столь резкой реакции на его работы о движениях у растений. Обратите внимание на наивно уверенную формулировку: «объяснить естественнонаучно, т. е. механически». Отрицать «механическое» объяснение физиологических процессов растений может только ретроград, пытающийся запутать весьма ясные вопросы рассуждениями на второстепенные темы. Все это можно объяснить намного проще, и не стоит наводить через маленькую речку большой мост...

Надо ли говорить, что Дарвин менее всего нуждается в поучениях на темы о необходимости последовательного истолкования биологических явлений именно в терминах точных наук — физики и химии, и это прекрасно понимали многие его современники. Вот, например, слова одного из известных физиков — Людвига Больцмана, сказанные им на торжественном заседании Венской академии наук вскоре после описываемых событий, в 1886 г.: «Если вы желаете знать мое глубокое убеждение о том,

как назовут со временем наш век — веком ли железа, пара или электричества, то я отвечаю, не задумываясь, его назовут веком механического объяснения природы, веком Дарвина».

И конечно же, труды Дарвина вовсе не являются попыткой ухода от «механического» объяснения движений у растений (будем считать, что мы уже адаптировались к несколько необычному использованию слова «механический» в этом контексте — таков стиль конца XIX в.). Предлагаемые современной ему физиологией растений простые механические объяснения этих процессов не устраивали Дарвина вовсе не потому, что они были простыми, механическими — а потому, что они были неверными.

Первое, в чем убедился Дарвин, наблюдая за подвижными органами насекомоядных и вьющихся растений, — это в невероятной чувствительности их «осязательных» органов. Например, отрезок женского волоса весом 0,000822 мг, находясь короткое время в соприкосновении со щупальцем росянки, вызывал его видимое движение.

Вот что писал по этому поводу сам Дарвин: «Чрезвычайно сомнительно, чтобы какой-нибудь нерв человеческого тела, даже в состоянии возбуждения, мог быть раздражен таким легким телом, погруженным в плотную жидкость и лишь постепенно приведенным в соприкосновение с нервом. Но клетки железки росянки в таких условиях в состоянии передавать двигательный импульс и вызывать таким образом движение в месте, удаленном от них на определенное расстояние. Вряд ли был когда-либо наблюдаем в растительном царстве более замечательный факт».

Не менее сильной оказалась чувствительность к прикосновению усиков некоторых лиан. Дарвин наблюдал изгибание усика под действием шелкового волокна весом 0,00025 мг!

В том что реакция этих органов носит приспособительный, эволюционно обусловленный характер, Дарвина убеждал не только факт их высокой чувствительности, но и избирательный характер такой реакции. Например, ни щупальца росянки, ни усики вьющихся растений не реагируют на удары дождя: «Очевидно, было бы большим злом для растений, — писал Дарвин, — если бы щупальца приходили в движение и загибались от каждого ливня».

Более того, Дарвин установил, что реакция щупалец

росянки только на механические раздражения является слабой и непродолжительной. Для получения в опытных условиях «нормальной» реакции необходимо дополнить механическое воздействие химическим. Дарвин наносил на щупальца росянки мельчайшую каплю раствора фосфорнокислого аммония, содержащую лишь 0,000423 мг растворенного вещества, и щупальце немедленно реагировало изгибом, в то время как такая же капелька чистой воды никакой реакции не вызывала.

Как оказалось, росянка столь же энергично реагирует на многие другие соединения, содержащие азот. Ведь ценность питательных веществ, извлекаемых растением из пойманных насекомых, определяется как раз содержанием в них азота. Наружный панцирь насекомого состоит из хитина — вещества довольно стойкого в химическом отношении. В составе же покрываемых им мягких тканей преобладают белки; содержатся в них и другие азотистые соединения. При начальном контакте насекомого с железками щупалец растение реагирует на очень незначительные количества азотсодержащих веществ, находящихся на поверхности панциря, в различного рода щелях, отверстиях и т. п. Приспособительный характер этой особенности реакции щупалец росянки также совершенно очевиден.

Какие же ткани щупальца росянки наделены чувствительностью? Дарвин показал, что раздражения, как механические, так и химические, могут воспринимать лишь клетки железок, находящихся на булавовидном утолщении щупальца (рис. 19, *б*), а реакция на эти раздражения передается в ткани ножки этого щупальца или даже соседних щупалец. При этом Дарвин открыл так называемое явление агрегации, сопровождающее распространение реакции в щупальце. Поверхностные клетки ножки содержат одну большую вакуоль, заполненную клеточным соком красного цвета. При раздражении вакуоль разделяется на ряд более мелких вакуолей причудливой формы, как бы переплетенных друг с другом. Через некоторое время после устранения источника раздражения отдельные вакуоли сливаются в одну центральную.

Таким образом, в опытах Дарвина был установлен еще один факт, противоречащий общепринятым представлениям: у растения имеются специализированные клетки, воспринимающие определенный тип внешних воздействий (по аналогии со сходными клетками органов

чувств у животных их следовало бы назвать рецепторными) и, что очень важно, раздражение от этих клеток может передаваться в другие, подчас значительно от них удаленные ткани и вызывать их специфическую реакцию — сокращение.

Это был самый главный аргумент в пользу принципиального сходства механизмов передачи раздражения у животных и растений. Исследования Дарвина стимулировали интерес современников к этой проблеме. Особенно подходящим объектом для изучения оказалась венерина мухоловка, обладающая, как мы уже говорили, исключительно быстрой реакцией на прикосновение. Лист мухоловки сгибается по центральной жилке, а чувствительным органом являются «осязательные щетинки», расположенные по три на каждой половинке листа. Быстрота двигательной реакции венериной мухоловки указывает на то, что передача возбуждения от «осязательной щетинки» к центральной жилке должна происходить практически мгновенно.

И вот в 1887 г. Бердон-Сандерсон устанавливает уже совершенно удивительный факт: при раздражении в листе венериной мухоловки наблюдаются электрические явления, в точности напоминающие те, которые происходят при распространении возбуждения в нервно-мышечных структурах животных. Некоторое время спустя наблюдения Бердон-Сандерсона подтверждает Мунк.

Работа Бердон-Сандерсона была выполнена после смерти Дарвина, однако великий ученый имел к этим результатам самое прямое отношение. Дело в том, что свои опыты Бердон-Сандерсон предпринял по совету Дарвина.

Карикатура нервной клетки

Конечно, не следует переоценивать доказательной силы опытов того же Бердон-Сандерсона. Хотя бы потому, что в конце прошлого века электрофизиология еще была наукой эмпирической и кроме установления самого факта электрической природы нервного возбуждения (это, конечно, немало) могла похвастаться лишь самыми общими описаниями электрических процессов, происходящих в нервно-мышечной ткани при возбуждении.

Несовершенные приборы не позволяли ни проследить развитие этих процессов во времени (для этого реакция приборов оказывалась чересчур замедленной), ни детали-

зировать их течение в отдельных клетках и структурах ткани. Так что своими измерениями Бердон-Сандерсон мог лишь установить некоторое общее сходство картины электрической реакции в сокращающейся мышце и в схлопывающемся листе мухоловки.

Впрочем, можно предположить, что этот результат в известной мере ожидали многие. После работ Дарвина, привлечших внимание ботаников к насекомоядным растениям, естественно, на первый план выдвинулась проблема физических механизмов распространения возбуждения в тканях таких растений. И во всех случаях удалось найти полугипотетические объяснения этих процессов на основе явлений диффузии или осмоса — что, впрочем, к тому времени стало почти модой в физиологии растений. Одна-единственная венерина мухоловка вызывала сомнения: уж очень быстро реагировала она на раздражение. Получалось, что раздражение от чувствительных волосков к двигательным тканям распространяется со скоростью по крайней мере несколько сантиметров в секунду — нечего говорить о такой быстрой диффузии какого угодно вещества в плотной листовой ткани (а в основе осмотических явлений, как мы помним, также лежит процесс диффузии). Поэтому мысль о том, что в листе мухоловки возбуждение передается электрическим путем, напрашивалась с некоторой даже назойливостью. Тем более что ботаники того времени слегка завидовали успехам бурно развивающейся «животной» электрофизиологии.

Первые доказательства участия каких-то электрических явлений в процессах передачи раздражения у растений некоторыми фитофизиологами были восприняты с совершенно неумеренным энтузиазмом; все чаще стали поговаривать о нервной системе растений. Это, конечно, очень соблазнительная тема для разговоров, и мы остановимся на ней подробнее — однако чуть позже. Нам кажется, что подобная беседа будет более содержательной, если мы предварительно познакомим читателя (хотя бы в самых общих чертах) с механизмом передачи возбуждения в нервной клетке и некоторыми сходными явлениями в клетке растительной.

Нервная система человека — истинное чудо биологической организации — выполняет сотни разнообразнейших функций. Структура нервной клетки, называемой нейроном, представлена на рис. 24. Отдельные нейроны, соединяясь друг с другом, могут образовывать более или

менее длинные цепи, по которым передается сигнал. Конечной целью такой линии сигнализации чаще всего является мышечное волокно, сокращающееся под действием этих сигналов. Здесь мы ограничимся описанием механизма прохождения электрического сигнала по вытянутому отростку нейрона — аксону.

Первоначально этот процесс нейрофизиологи представляли себе очень просто. Аксон рассматривался как электрический кабель, проводящая часть которого — аксоплазма, насыщенная электролитами, изолирована мембраной, состоящей из жироподобного вещества. Однако при более тщательном измерении электрических характеристик нервной клетки было установлено, что ее мембрана довольно плохой изолятор; таким образом, всякий электрический сигнал, передаваемый по такому «кабелю», должен прогрессивно ослабляться за счет утечки тока наружу, так что максимальное расстояние, которое он был бы способен преодолеть, не должно превышать нескольких миллиметров.

Каким же образом нервным клеткам удастся передавать импульс на значительные расстояния? В настоящее время благодаря трудам А. Л. Ходжкина, А. Ф. Хаксли и Б. Катца мы можем дать более или менее исчерпывающий ответ на этот вопрос.

Наружная жидкость, в которую погружены нервные клетки, имеет почти ту же суммарную концентрацию одновалентных катионов — калия и натрия, что и внутреннее содержимое аксона. Эта концентрация довольно

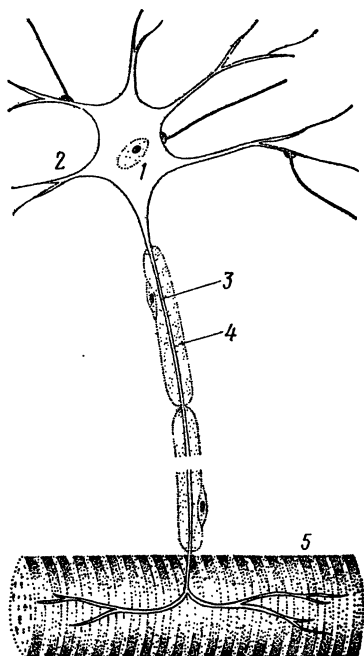


Рис. 24. Схема строения нервной клетки (нейрона): 1 — ядро; 2 — тело нейрона; 3 — аксон; 4 — миелиновая оболочка; 5 — мышечное волокно

высока и достигает половины моля. Однако если снаружи преобладают ионы натрия (их примерно в 30-50 раз больше, чем калия), то в аксоплазме это соотношение почти столь же сильно сдвинуто в пользу калия — ионы натрия составляют не более 10% общего количества одновалентных катионов. Механизмы предпочтительного накопления нервными клетками калия и «изгнания» натрия в принципе аналогичны описанным в предыдущей главе поглощательным системам растительных клеток, и мы их рассматривать не будем.

В обычном, невозбужденном, состоянии мембрана аксона хорошо проницаема для ионов калия и плохо — для ионов натрия. Повторяя рассуждения раздела «Один электрод вводится внутрь клетки...» (первая глава), можно прийти к выводу, что аксоплазма окажется отрицательно заряженной по отношению к наружному раствору (проницаемость мембраны к анионам очень мала). В результате устанавливается некоторая разность потенциалов между содержимым клетки и средой. В наиболее излюбленном электрофизиологами объекте — гигантском аксоне кальмара — разность потенциалов составляет около -60 мВ*.

Мембрана же аксона обладает замечательным свойством: если абсолютную величину разности потенциалов между аксоплазмой и наружным раствором понизить, прилагая внешнее электрическое поле, проницаемость для ионов натрия начинает возрастать и растет тем больше, чем больше величина мембранного потенциала удаляется от значения, характерного для клетки в состоянии покоя, т. е. — 60 мВ.

Нетрудно видеть, что процесс этот — самовозбуждающийся: ведь при увеличении проницаемости мембраны для натрия его поток в клетку увеличивается и, в силу низкой проницаемости мембраны для анионов, появляется дополнительная компонента мембранного потенциала, имеющая положительный знак, т. е. обратная по направлению существующему потенциалу покоя, обусловленному, как мы уже говорили, высокой концентрацией калия внутри клетки.

Чем больше проницаемость мембраны для натрия, тем более сдвигается мембранный потенциал в положительную

* И симпатии исследователей, и эпитет «гигантский» вполне оправданы — диаметр такого аксона достигает 1 мм.

сторону, увеличивая проницаемость мембраны для натрия, и т. д. Предел развития этого процесса определяется соотношением концентраций натрия вне и внутри мембраны: сколько бы ни возрастала ее проницаемость для этого иона, разность потенциалов между аксоплазмой и наружной средой не может превзойти величины 0,058 В на каждый порядок различия в концентрациях внутреннего и наружного растворов: 2·0,058 В при стократном их различии, 3·0,058 при тысячекратном и т. п. — вспомним опять рассуждения, приведенные в разделе «Один электрод вводится внутрь клетки...»

Таким образом, стоит дать мембране аксона некоторый толчок в виде импульса электрического тока, направленного изнутри клетки наружу и снимающего тем самым мембранный потенциал, как величина этого потенциала автоматически начнет сдвигаться в положительную сторону вплоть до изменения знака и достижения некоторой предельной величины.

Отметим, однако, две важные особенности описанного процесса. Во-первых, для того чтобы он начался и впоследствии развивался самопроизвольно, необходим не всякий электрический импульс, а импульс некоторой минимальной силы, изменяющий мембранный потенциал на величину не менее так называемой пороговой. На импульсы меньшей силы мембрана не реагирует увеличением натриевой проницаемости, и тут же, после снятия приложенной разности потенциалов, мембранный потенциал возвращается к своему нормальному значению, соответствующему потенциалу покоя.

В противном случае, как легко сообразить, этот процесс вызывался бы любым, сколь угодно малым случайным изменением мембранного потенциала в положительную сторону.

Во-вторых, высокая проницаемость мембраны по отношению к натрию сохраняется после достижения максимального положительного значения мембранного потенциала лишь очень непродолжительное время. После этого наблюдается снижение натриевой проницаемости до исходного уровня, сопровождающееся временным увеличением проницаемости по калию, и восстанавливается первоначальная величина мембранного потенциала. Таким образом, в результате приложения кратковременного импульса тока наступит непродолжительное местное изменение мембранного потенциала. Всякий внешний импульс

может либо вызвать описанное явление, либо нет, однако в первом случае форма временной кривой этого процесса (рис. 25,а) не зависит ни от силы, ни от продолжительности возбуждающего импульса.

Мы уже говорили, что мембрана аксона — сравнительно плохой изолятор; поэтому при местном приложении возбуждающей разности потенциалов данный эффект первоначально ограничится небольшим участком мембраны. Однако границы этого участка будут постоянно шириться за счет того, что изменение разности потенциалов вблизи границы будет инициировать изменение натриевой проницаемости соседних участков мембраны и т. д.

В результате произойдет волнообразное распространение «всплеска» разности потенциалов вдоль аксона — возникнет так называемый потенциал действия, или спайк.

Именно этот процесс играет важнейшую роль в передаче нервного возбуждения. Скорость распространения импульса по этому механизму, как нетрудно видеть, определяется быстротой реакции мембраны (в смысле увеличения натриевой проницаемости) на изменение величины мембранного потенциала. Эта скорость значительно меньше скорости собственно электрического тока, но все же достаточно высока — порядка десятков метров в секунду.

Заметим также, что этот сигнал не ослабевает по мере продвижения вдоль аксона. Через миллисекунды чувствительность мембраны аксона восстанавливается — нейрон готов к проведению следующего импульса.

Сравним теперь эту высокоспециализированную биологическую структуру с нашей знакомой — клеткой харовой водоросли нителла. Жесткой целлюлозной оболочкой у нейрона нет, нет и вакуоли — вся внутренность клетки представлена цитоплазмой. Однако сама мембрана нервной клетки — образование, чрезвычайно сходное с плазмалеммой или тонопластом растительных клеток: это такая же олигомолекулярная пленка толщиной 50—100 Å, также содержащая по преимуществу белки и липиды. Наконец, как и мембраны растительных клеток, мембрана нейрона обладает высокой селективностью по отношению к ионам и способностью к активному их переносу — калий, как мы помним, транспортируется внутри клетки, натрий — наружу.

И все-таки самый замечательный элемент сходства

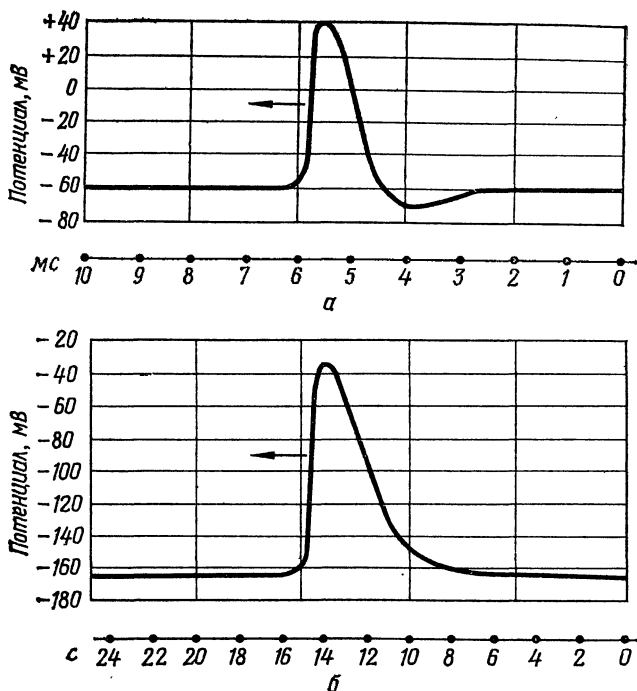


Рис. 25. Потенциалы действия гигантского аксона кальмара (а) и клетки харовой водоросли (б)

между этими двумя столь, казалось бы, непохожими клетками заключается в том, что клетка нителлы способна генерировать потенциал действия. В экспериментах, полностью сходных с теми, в которых исследовалось электрическое возбуждение нервных клеток, было показано, что реакция клеток нителлы (как, впрочем, и многих других растительных клеток) на раздражение электрическим импульсом принципиально не отличается от реакции того же аксона.

Кроме того, увеличение разности потенциалов за счет внешнего источника в сторону отрицательных значений также не вызывает никаких эффектов; приложение разности потенциалов обратного знака, превышающей некоторый пороговый предел, провоцирует развитие в клетке тех же событий — возникновение потенциала действия. Даже и сама форма волны этого потенциала весьма сходна у обеих клеток (рис. 25, а, б).

С другой стороны, реакция растительной клетки намного медленнее: если у нервных клеток скорость распространения импульса достигает десятков метров в секунду, то у растительных — лишь несколько сантиметров в секунду; длительность самого импульса — соответственно миллисекунды или секунды (в отдельных случаях даже десятки секунд).

И все же не подлежит сомнению, что различия эти непринципиальные. В их основе лежит один и тот же механизм — способность мембраны под воздействием электрического поля временно изменить свою проницаемость по отношению к определенным ионам. И следует добавить, что в большинстве возбудимых растительных клеток потенциал действия развивается вследствие изменения проницаемости мембраны не к ионам натрия, а к ионам хлора: их поток устремляется из вакуоли наружу, и нетрудно понять, что это окажет точно такое же влияние на величину мембранного потенциала, что и «прорыв» ионов натрия внутрь клетки.

Наконец, позволим себе горькую шутку — аналогия между нервной и растительной клеткой заключается еще и в том, что в обоих случаях механизм внезапного изменения проницаемости мембраны под действием электрического импульса не получил до сих пор объяснения. Как выразился один из творцов современной теории нервного возбуждения Б. Катц, «одна из немногих оставшихся крупных проблем (этой теории. — Авт.) касается физико-химической природы изменений проводимости и механизма ее электрической регуляции». Так что не нам, а популяризаторам будущего придется писать о том, как покорителю этой проблемы пришла в голову мысль о принципе электрической регуляции проницаемости биологических мембран.

Помехоустойчивая мухоловка

«Пуритане должны носить два фиговых листка на глазах», — сказал как-то известный польский сатирик Станислав Ежи Лец. Точно так же и правоверный ботаник конца прошлого века все упоминания об электрических сигналах, управляющих поведением отдельных органов растения, воспринимал как шарлатанские вылазки недобросовестных или крайне экстравагантных исследователей — и изо всех сил старался их не замечать.

Мы уже говорили, что многие ботаники, и не в последнюю очередь великий Дарвин, подвергались публичному осмеянию только за проявление должного внимания к самому факту существования насекомоядных растений. Когда же речь зашла о том, что движения ловчих органов таких растений, по-видимому, обусловлены электрическими сигналами, авторов такого рода сообщений вообще отказались принимать всерьез.

Опять с успехом применяли страшное и универсальное оружие официальной науки — этих работ попросту не замечали. С тем же высокомерием, с которым Сакс отказался рассматривать книгу Дарвина в соответствующих разделах своего учебника, физиологи растений многие годы игнорировали работы Бердон-Сандерсона, Леваковского, Кабша. С другой стороны (и здесь опять напрашивается историческая параллель — на этот раз с открытием Гальвани), обсуждаемые успехи фитофизиологов привлекли группу довольно шумных энтузиастов. Избегая прямых и серьезных исследований в этой области, они соревновались главным образом в написании различного рода спекулятивных работ о строении «нервной системы» растений. О последствиях этого уклона нам еще предстоит поговорить более подробно; здесь мы отметим только, что ни сам тон, ни аргументация, использовавшаяся в такого рода статьях, не могли вызвать симпатии научной общественности к развитию электрофизиологических исследований на растениях.

Время, однако, — замечательный фильтр научных идей. Ныне, почти сто лет спустя после того взрыва страстей, о котором мы говорим, можно, наконец-то, высказать некоторые вполне определенные заключения по поводу электроуправляемости ловчих органов насекомоядных растений.

Итак, что же известно на эту тему современному биологу, располагающему электронной регистрирующей аппаратурой, точнейшими микроманипуляторами и прочей совершенной техникой эксперимента?

Заметим вначале, что очень важные детали механизма «срабатывания» ловчих органов удалось выявить без особых экспериментальных ухищрений. Оказалось, например, что для закрытия листа венериной мухоловки необходимо два стимула: либо дважды задеть один и тот же чувствительный волосок (мы помним, что на каждой половинке листа таких волосков три), либо последователь-

но — два различных волоска, причем интервал между двумя раздражениями должен составить не более 20 секунд.

Закрытие ловчего листа будет одинаково быстрым и резким, если между повторными раздражениями пройдут 5, 10 и 15 секунд. Однако если интервал между раздражениями превышает 20 секунд, быстрота реакции растения снижается, и лист закрывается неполностью; если повторный толчок чувствительного волоска происходит спустя 40—50 секунд после первого, признаков движения листа практически нет. Примечательно, что у ближайшей родственницы венериной мухоловки — альдрованды — наблюдается точно такая же особенность: для закрытия ее неподвижного листа необходимо два последовательных раздражения чувствительной щетинки.

Приспособительный смысл такого способа «срабатывания» ловчих органов очевиден: исключаются бесполезные закрытия листа под действием случайных, нерегулярных толчков. Но насколько же более сложным должен быть механизм, вызывающий закрытие!

Он известен лишь в самых общих чертах. Установлено, что при сгибании чувствительного волоска (мы опять говорим о венериной мухоловке) в клетках его основания снижается электрический потенциал. Совершенно аналогичное явление, кстати сказать, имеет место и в чувствительных клетках животных — так называемый рецепторный потенциал. Как мы уже знаем, снижение величины клеточного потенциала ниже некоторого порогового значения приводит к появлению потенциала действия. Он передается от основания чувствительного волоска по наружной поверхности листа во все стороны. Если вскоре раздражение повторяется и опять возникает потенциал действия, скорость его распространения существенно увеличивается. Создается такое впечатление, что первое раздражение как бы приводит ловушку в состояние готовности, а второе является собственно сигналом к захлопыванию.

Несколько иной механизм раздражения щупалец росянки. Можно предполагать, что любая поверхностная клетка щупальца способна реагировать на прикосновение снижением клеточного потенциала, вызывая тем самым потенциал действия, распространяющийся по волоску к основанию. Под его влиянием происходит изгиб щупальца, воспринявшего раздражение; более того, благодаря передаче потенциала действия через основание на другие

щупальца происходит и их изгибание, — всегда в направлении щупальца — первоначального источника потенциала действия.

Скорость распространения потенциала действия у росянки меньше, чем в листе мухоловки, — примерно 0,5 см/с. Как уже говорилось, реакция и движение росянки также более медлительны.

В первых опытах по непосредственному стимулированию ловушек мухоловки или альдрованды электрическим током характерного для этих растений механизма срабатывания наблюдать не удалось; они закрывались после первого же импульса. Впоследствии, однако, выяснилось, что дело здесь в методе стимулирования: сильный ток пропускали либо вдоль главной жилки листа мухоловки, либо через воду, в которой плавала ловушка альдрованды. Если же на поверхности листа вблизи друг друга помещали пару электродов, кратковременный импульс тока вызывал появление первой волны потенциала действия, после которой ловушка оставалась открытой, а закрытие ее достигалось — так же как и при механическом раздражении — вторым импульсом. Этот опыт окончательно подтвердил предположение о том, что закрытие ловушки осуществляется под действием электрических сигналов.

Что же касается организации системы срабатывания механизма ловушек, то у всякого человека, знакомого с электронной техникой, самопроизвольно всплывает в сознании термин «помехоустойчивость». Например, радиолокатор должен регистрировать и определенным образом обрабатывать сигналы, отраженные целью — самолетом, ракетой, кораблем и т. п. Если эти сигналы будут иметь форму единичного импульса, увеличивается вероятность ошибки — прибор может «принять за сигнал» любую случайную помеху. Для того чтобы этого не произошло, используют сигналы более сложной формы, скажем несколько импульсов, разделенных определенными промежутками времени. При этом опасность ошибки уменьшается — ведь маловероятно случайное появление нескольких импульсов-помех именно в том порядке, в каком это предусмотрено принятым кодом. А простейший код такого рода — два последовательных импульса, разделенных не очень большим промежутком времени.

К сожалению, ничего неизвестно о механизме «запоминания» листом мухоловки первого сигнала; неизвестно

также, почему закрытие листа вызывает только суммарный эффект двух раздражений; возможно, правильное было бы назвать это последствием или задержкой реакции. Но что делать — ботаник, получивший в руки гальванометр, поневоле попадает в плен «электронной» терминологии. Только что мы вспоминали помехоустойчивость; откроем теперь фундаментальный обзор Сибаоки «Физиология быстрых движений у высших растений» — и мы найдем в нем рассуждения о «запоминающем устройстве» листа венериной мухоловки...

Способность реагировать «хватательными» движениями щупалец на различные химические раздражители, открытая Дарвином у росянки, характерна и для листа венериной мухоловки. В этом случае также появляются сигналы — волны потенциала действия; обычно это серия импульсов, следующих один за другим с небольшими промежутками.

Более того, оказалось, что в процессе переваривания пойманного насекомого в листе мухоловки самопроизвольно время от времени возникают потенциалы действия. По-видимому, именно благодаря им лист поддерживается в закрытом состоянии до конца переваривания добычи. В самом деле, если вызвать закрытие ловушки механическим раздражением и при этом внутри не окажется никакой добычи, она вновь откроется примерно через 10 часов, причем все это время не генерируются никакие потенциалы действия. Если же в ловушке находится насекомое, она может оставаться закрытой многие сутки, и «хватка» ее будет периодически поддерживаться потенциалами действия, возникающими под влиянием химического раздражителя — продуктов переваривания жертвы.

Не будем преувеличивать масштабов успеха, достигнутого на пути исследования механизмов действия ловчих органов насекомоядных растений; можно, пожалуй, сказать, что исследования современного уровня в этой области едва-едва начаты. По-видимому, нам еще не раз предстоит услышать об интересных и даже сенсационных открытиях; ведь чем ближе мы знакомимся с той же росянкой, мухоловкой или альдровандой, тем больше удивляемся их сложно организованным и хорошо скоординированным действиям. И, несомненно, самое удивительное — совершенная система внутренней электрической сигнализации, управляющая этими действиями.

Глава 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИГНАЛИЗАЦИЯ РАСТЕНИЙ

На примере насекомоядных растений мы познакомились с сущностью и физиологической ролью еще одного класса электрических явлений в растениях — потенциалов действия. К сожалению, в нашем повествовании часто приходится обращаться к избитым выражениям типа «физический механизм, лежащий в основе этого явления, неизвестен», «природа описанного эффекта не выяснена» и т. п. И все же после каждого такого замечания остается не столько ощущение беспомощности, сколько манящее чувство неразгаданных тайн, которые биологам еще предстоит постичь. За каждым «я не знаю» биолога сегодняшнего дня скрываются, возможно фантастические, удивительные свершения завтрашней науки. Настоящий бум электрофизиологических исследований на растениях еще впереди. Можно надеяться, что в ближайшие десятилетия мы узнаем много интересного о природе и назначении потенциалов действия в растениях, об их роли в управлении различными физиологическими процессами, быть может — о направленном изменении этих процессов с помощью искусственной электростимуляции. Однако пока мы знаем о растительном электричестве не так уж много.

Электромимоза

О мимозе слышали все.

Родом мимоза из тропической Америки. У себя на родине она расселяется буквально где придется и считается заурядным сорняком.

В XVII в., после британской экспансии в районе Антильских островов и Центральной Америки, мимоза становится известной в Англии. Король Карл II Стюарт, предпоследний из Стюартов, даже поручил члену основанного им Королевского общества, доктору Кларку, исследовать странное движение листьев мимозы. Не то чтобы Карл был горячим покровителем наук. Он начал править вскоре после смерти Кромвеля и, по мнению своих подданных, прежде всего должен был бы заняться устранением запутаннейших религиозных распрей, сотрясавших страну. Современники упрекали короля в отсутствии должного интереса к этим важным государственным делам и дали ему прозвище «веселый монарх». Его увлекали приемы, охота, балы и естественнонаучные опыты. Последнее занятие было в то время модным светским развлечением. В Пизе, например, знаменитый Мальпиги забавлял придворное общество показательными вскрытиями живых собак — дамам очень нравилось наблюдать, как бьется обнаженное сердце.

Таким образом, Кларк оказался первым зарегистрированным историей ботаники исследователем мимозы, а Карл II, побудивший его к этим исследованиям, по современным представлениям, должен считаться его научным руководителем. Систематический рассказ об их последователях нам, пожалуй, не под силу — очень уж их много. Тем более, что в XVII—XVIII вв. слух о заморской диковинке, шевелящей листьями, прошел по всей Европе; ученые философы, никогда в глаза не видавшие мимозы, пускались в пространные рассуждения о ее свойствах. Хотя бы краткое упоминание о мимозе стало с тех пор обязательным элементом любого курса фитологии (ботаники).

По-видимому, о ней говорит в своей книге «Комментарии к философии, логике, а также метафизике и физике» (Вильно, 1755) новогрудский профессор А. Скорульский: «Есть растения, которые сжимаются при прикосновении к ним рукой...» Правда, эта информация находится в одном ряду со следующими «достоверными» сведениями: «Лилии, сорванные рукой некоторых людей, вдруг исчезают во всем саду. Тень ореховых и лавровых деревьев очень вредна». Впрочем, чтобы избежать возможных упреков в склонности к мистике, А. Скорульский заключает: «Эти и подобные им свойства не следует приписывать

тайным качествам, объяснение их надо искать в истечении, жаре, холоде и т. д.».

Но оставим в покое XVIII и значительную часть XIX в. Мы завели речь о мимозе, потому что движения ее листьев тоже управляются с помощью электрической системы сигнализации. К ее рассмотрению мы и перейдем. Однако следует предупредить читателя — изображенные на открытках «С днем 8 Марта» желтоватые скромные цветочки и серебристо-зеленые веточки ничего общего не имеют с предметом нашей беседы — мимозой стыдливой (*Mimosa pudica*).

Правильное название этого растения (принадлежащего, однако, к подсемейству мимозовых) — акация, а известные под этим именем кустарник (желтая акация) и дерево (белая акация), в свою очередь, состоят с ней в весьма отдаленном родстве и, строго говоря, должны были бы называться карагана (*Caragana*) и робиния (*Robinia*). Впрочем, часть ботаников считает, что и карагану следует называть робинией (*Robinia caragana*).

Итак, мимоза — это мимоза, рыночная мимоза — это акация; и не нужно экспериментировать с ее веточкой, требуя исполнения совершенно не свойственного ей трюка — шевеления листьями. Ибо для этого ей потребуются особые, довольно хитро устроенные органы.

Каким же образом реагирует мимоза — настоящая мимоза — на внешнее механическое раздражение?

Опускание ее листьев обусловлено сокращением сочленовой подушечки, поддерживающей листовую черешок. Такого же типа подушечки, но поменьше расположены в местах прикрепления к главному черешку четырех подчерешков и совсем мелкие — у каждой листовой доли.

При легком встряхивании или ударе черешок опускается вниз, четыре подчерешка спадают попарно назад, противоположные доли складываются вместе и вытягиваются вверх (рис. 26, а, б).

Двигательная реакция мимозы часто упоминалась в дискуссии немецких фитофизиологов с Дарвином как пример крайне простого («механического») объяснения подобного рода явлений. При внимательном наблюдении за опадением листа можно заметить, что оно происходит вследствие, как мы уже говорили, сокращения в объеме так называемой сочленовой подушечки листа (рис. 27, а). Модель предлагавшегося механического истолкования этого явления изображена на рисунке 27, б. Клетки сочле-



Рис. 26. Ветка мимозы:
a — в обычном состоянии;
б — при раздражении

новой подушечки представлены здесь в виде цилиндра с сифоном и поршнем, поддерживающим лист. Жидкость под действием тяжести листа, давящего на поршень, поднимается по трубке сифона на определенную высоту, однако не достигает колена. Если же лист на непродолжительное время нагрузить дополнительно, жидкость пойдет через колено сифона и опустится до уровня, более низкого, чем ее уровень в цилиндре. Теперь, если даже дополнительная нагрузка будет снята, значительная часть жидкости из цилиндра вытечет наружу, и лист опустится.

Как видим, все очень просто, получено исчерпывающее объяснение наблюдаемых фактов, и, самое главное, совершенно незачем прибегать к таким понятиям, как чувствительные клетки, передача раздражения, реакция на раздражение и т. п.

Конечно, очень скоро эти наивные представления пришлось оставить; самое поверхностное изучение процесса движения листьев у мимозы показало, что он организован намного сложнее.

В отличие от росянки, мухоловки и альдрованды у мимозы способностью воспринимать раздражение в разной степени наделены почти все части листа. Самой большой чувствительностью обладают так называемые «осязательные волоски», расположенные в ряд поперек сокращающейся сочленовой подушечки. Их число на одной подушечке невелико — всего 4 или 5. Достаточно легкого прикосновения к одному из них, чтобы лист опустился; как видим, система мер предосторожности, характерная для листа мухоловки, у мимозы отсутствует.

Очень любопытно устройство волоска. Он направлен под некоторым углом к поверхности сочленовой подушечки, прикрывая своим основанием утолщение, образованное округлой формы чувствительными клетками (рис. 27, *а*). Ствол волоска состоит из жестких одревеснев-

ших клеток и при нажатии действует как рычаг, сдавливая чувствительную ткань, — В. Арциховский сравнивает этот механизм со щипцами для орехов, отмечая, что таким образом можно усилить даже самые слабые толчки.

Габерляндт, первым указавший на существование чувствительных волосков, считает, что они функционируют как элемент защитного приспособления, ограждающего растение от наземных насекомых, например муравьев. Жесткий, усеянный шипами стебель мимозы вряд ли может возбудить аппетит насекомых, а при попытке переползти на лист они должны преодолеть ряд чувствительных волосков, что неминуемо вызывает опадение листа.

Основная же цель движений листьев у мимозы — спасение от травоядных животных. Такое предположение высказал еще Ф. Кон: листья мимозы невозможно обглодать — при малейшем прикосновении они опадают, прижимаясь к колючему стеблю.

Первое исследование электрической природы передачи возбуждения у мимозы было выполнено, как мы уже отмечали, Н. Леваковским еще в середине

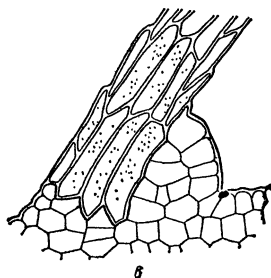
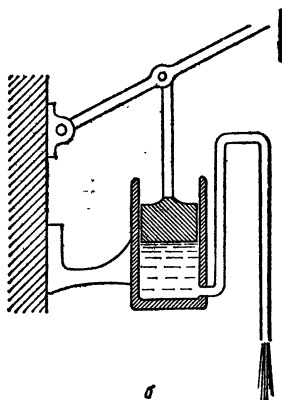
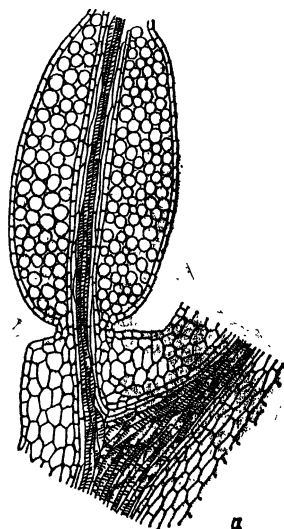


Рис. 27. Срез сочленовой подушечки мимозы (а), гидравлическая модель опускающегося листа мимозы (б), основание чувствительного волоска (в)

XIX в. Однако решающие эксперименты были поставлены много позднее — независимо немецким ботаником Кункелем и индийским биофизиком Босом. В известной мере эти эксперименты сыграли в изучении электрических механизмов возбуждения у мимозы ту же роль, что и работа Бердон-Сандерсона для насекомоядных растений.

Используя уже знакомую нам терминологию более позднего периода, можно сказать, что Кункель и Бос зарегистрировали появление потенциала действия при опускании черешка мимозы и (опять же подобно Бердон-Сандерсону) отметили аналогию обнаруженных ими электрических эффектов с токами действия, возникающими в мышце животного при ее сокращении.

Доброй половиной сведений о физиологии раздражимости мимозы, которыми мы располагаем к настоящему времени, ботаническая наука обязана Джагдишу Чандра Босу — ученому чрезвычайно яркому и оригинальному. Прекрасный экспериментатор, он создал много приборов, революционизировавших современную ему технику постановки биофизического опыта на растительных объектах. Талант популяризатора и мастерство полемиста снискали ему славу не только в научных кругах. В Калькутте им был основан исследовательский институт, носящий сейчас его имя.

Можно провести некоторую параллель между двумя большими учеными в их отношении к излюбленному объекту исследования. Так же как Дарвин с трогательной симпатией отзывался о росянке, занимавшей его внимание почти два десятилетия, вплоть до самой смерти (мы приводили его высказывания по этому поводу), Бос прочувствованно говорил о мимозе, утверждая, что «главный стебель ее или черешок похож на руку, а четыре расставленные подчерешка — на растопыренные пальцы». Он постоянно восхищался совершенством координации движений листьев мимозы — «стыдливой невесты», как ее называют в Бенгалии. Вход в Главный зал Института им. Боса в Калькутте украшен филигранной резьбой, окружающей изображения двух основных объектов, с которыми работал Дж. Ч. Бос, — мимозы и десмодиума.

Для исследования реакции мимозы Бос сконструировал несколько приборов, позволяющих, в частности, очень точно регистрировать временной ход движений отдельных органов. Он установил, что если сочленовую подушечку подвергнуть мгновенному раздражению, например очень

коротким импульсом электрического тока, ее реакция (механическое движение) не будет мгновенной.

Существует некоторое запаздывание, хотя и очень маленькое — всего около 0,1 секунды. По прошествии этого времени прибор начинает регистрировать сокращение подушечки и движение листа. Следует сказать, что такая скорость реакции сравнима со скоростью реакции многих животных.

Период сокращения, т. е. время пребывания листа в движении при складывании, по измерениям Боса, составляет около трех секунд. После непродолжительного покоя в опущенном состоянии лист начинает подниматься; скорость подъема очень невелика по сравнению со скоростью опускания; общее время так называемого периода восстановления — возвращения листа в исходное состояние — примерно 16 минут, т. е. в 300 раз больше времени сокращения.

Если последовательные раздражения осуществлять чересчур часто, наступает утомление — ответ растения на раздражение становится более вялым, происходит неполное опускание листа. Интересно, что именно таким образом ведет себя и мышца животного, например лягушки (рис. 28, а, б).

Бос установил также, что зимой реакция мимозы сильно замедляется, значительно затягивается период восстановления. На характер движения сильно влияют различные наркотические вещества, подчас причудливым образом изменяя кривую опускания — подъема листа. Особенно странные кривые вычерчивали приборы, подключенные к растениям, подвергшимся действию алкоголя. Бос замечает по этому поводу: «Не так ли действует он и на человека? Вот благодарная тема для антиалкоголика».

Более поздними исследованиями было установлено, что механизм передачи раздражения у мимозы довольно сложен. Прежде всего, раздражение ударом отдельного листа чаще всего не передается другим листьям через стебель; если удар не очень сильный, потенциал действия распространяется по листовому черешку лишь до сочленовой подушечки. Слабое раздражение кончика одного из подчерешков может передаваться только соседним подчерешкам. На рис. 29 показаны пути распространения потенциала действия при слабом раздражении одного из подчерешков. Как видим, при раздражении одного из двух

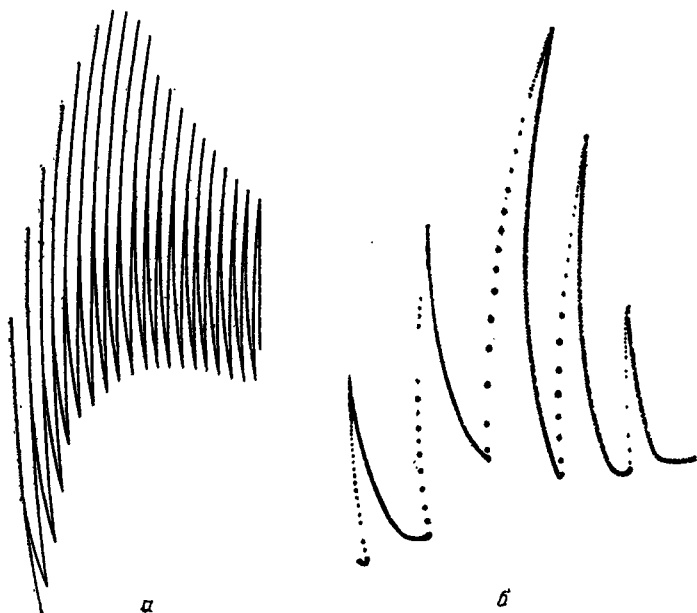


Рис. 28. Реакция утомления: *а* — мышца лягушки; *б* — черешок мимозы

центральных подчерешков реагируют в конечном счете три подчерешка — два центральных и один крайний; если же раздражается крайний подчерешок — возбуждение передается лишь одному центральному подчерешку, соседнему с ним.

Помимо волны потенциала действия, возникающей при раздражении ударом, в проводящих путях мимозы может распространяться и другой тип возбуждения — так называемая медленная волна, появляющаяся исключительно при порезах, надломах, ожогах и химических раздражениях. Природа этой волны — не электрическая; как считают, она связана с распространением так называемых раневых гормонов — специфических регуляторных веществ, возникающих в ткани при механическом повреждении.

В отличие от потенциалов действия, возникающих при ударе и, как упоминалось, обычно не распространяющихся за пределы одного листа или даже части подчерешков, медленная волна свободно минует сочленовые подушечки, омертвевшие участки стебля или черешка и т. п. Дости-

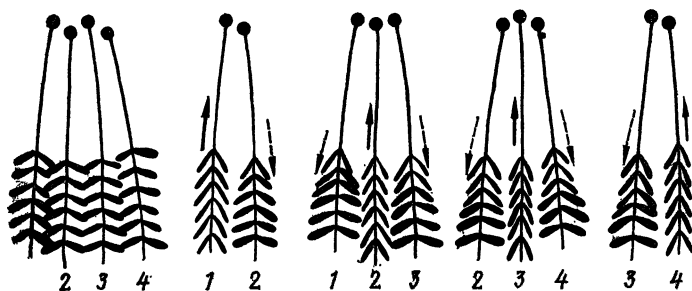
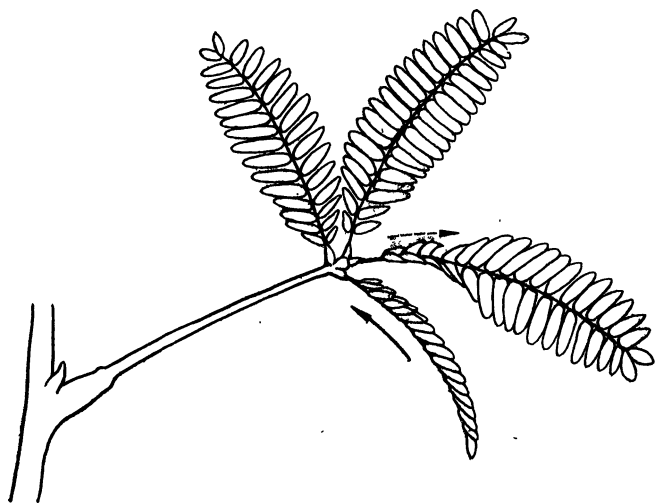


Рис. 29. Распространение потенциала действия при раздражении одного из подчерешков листа мимозы

гая стебля, медленная волна вызывает возникновение потенциала действия, передающегося вдоль стебля и проводящего к опусканию близлежащих листьев.

Иными словами, мы видим две специализированные, но взаимодействующие системы передачи возбуждения. Более того, специализация путей прохождения волны потенциала действия в стебле заключается еще и в том, что ее движение вверх и вниз осуществляется по двум разным проводящим тканям — внутренней и внешней флоэме.

Медленная волна, как это явствует из названия, распространяется не столь быстро, как потенциал действия.

Бос разработал сложную и весьма совершенную методику измерения скорости проведения раздражения. С ее помощью он измерял скорость проведения раздражения в черешке листа мимозы; она оказалась равной 2 см/с, совпадая, таким образом, со скоростью проведения импульса в листе мухоловки. Наконец, исследуя восприимчивость мимозы к раздражению электрическим током, Бос нашел, что сочленовая подушечка обладает в этом смысле невероятно высокой чувствительностью.

Многим из нас приходилось проверять годность батарейки карманного фонарика кончиком языка. Если батарейка не «села», при замыкании языком выводящих пластин ощущается интенсивный кислотоватый металлический привкус. Как установлено, минимальная сила тока, воспринимаемая таким образом, составляет шесть микроампер; мимоза реагирует движением листа на силу тока, в десять раз меньшую! «Я был введен в заблуждение, — писал Бос, — господствующим убеждением, что возбудимость растений значительно ниже возбудимости животных... В дальнейшем я установил, что чувствительность мимозы к электрическому раздражению не ниже, чем чувствительность животных».

Потенциал действия у высших растений

Прочитав предыдущий раздел об электроуправляемых движениях растений, читатель может подумать, что явления такого рода характерны только для нескольких очень странных, скорее исключительных случаев, и представляют собой редкостную и забавную игру природы. Все это время речь шла о растениях довольно экзотических и уж совершенно нетипичных, и возникает вопрос: а может быть, только они и наделены столь удивительно устроенной системой сигнализации?

На самом деле все обстоит не так: мы рассмотрели наиболее броские примеры явления очень распространенного, а в некоторых деталях даже универсального.

Прежде всего обратимся к тем движениям органов у растений, которые не отличаются особой быстротой, но более распространены. Возьмем хотя бы очень известное явление — так называемый «сон растений», т. е. способ-

ность некоторых цветов и листьев складываться или раскрываться в зависимости от времени суток. Каждый из нас наблюдал его неоднократно, о нем сообщается в самых древних ботанических исследованиях.

Название «сон растений» возникло, по-видимому, также очень давно. Во всяком случае, достоверно известно, что епископ Альберт Великий, живший в XIV в., говорил именно о сне растений (может быть, понимая это буквально), за что, естественно, был обвинен в ереси.

Первая научная работа, специально посвященная исследованию этого явления, была написана Карлом Линнеем и называлась она «О сне цветов». Понимая условность этого названия, ботаники впоследствии пытались заменить слово «сон» более приемлемым термином (например, «никтитропизм»), но ничего из этого не вышло; по сей день упорно говорят и пишут о «сне растений».

В качестве классического примера подобных движений листьев обычно приводят клевер или кислицу (рис. 30), цветов — всем известные вечерние раскрытия цветов матиолы или душистого табака. И здесь есть своего рода чемпионы: альпийская горечавка, например, в облачную погоду закрывается всякий раз, как только на солнце набегаёт тучка, и открывается с первыми его лучами. В прошлом веке было модно устраивать в садах «часы-клумбы», на которых подбирались цветы, раскрывающиеся в разное время суток.

Способностью закрывать листья обладает и комнатное растение традесканция, известное также под названием «бабья сплетня». Горшочки со свисающими плетями традесканции обычно украшают стены и перегородки многих кафе, составляя неотъемлемую часть интерьера. Так вот, именно на традесканции впервые было показано, что медленные закрытия листьев обуславливаются электрическими сигналами, представляющими собой потенциал действия. Это обнаружил японский исследователь Кокецу еще в 20-х годах нашего века. Ему удавалось вызвать потенциалы действия с помощью электрического раздражения и искусственным путем стимулировать закрытие листьев. Совсем недавно были выполнены аналогичные исследования механизма складывания листьев табака; они полностью подтвердили наблюдения Кокецу.

Электрическое управление движениями органов (может быть, не столь заметными внешне, но очень важными для жизнедеятельности) отмечено у многих растений, а



Рис. 30. Кислица. Крайний лист слева в «ночном» состоянии

потенциал действия как средство управления различными физиологическими функциями (не обязательно связанными с механическими движениями) присущ, по-видимому, всем высшим растениям.

Действительно, мало кто из читателей видел мимозу, мало кто обращал внимание на росянку, если даже она и попадалась на глаза, и почти наверняка никто не видел венериной мухоловки. Но вот василек, подсолнух, барбарис видели все; а многим ли известно, что тычинки цветков этих растений при легком прикосновении приходят в движение?

Это явление у подсолнуха впервые было описано еще в 1600 г. (Баугин). Очень хорошо видны такие движения у артишока — овоща, культивируемого главным образом в странах средиземноморья. Перед войной он возделывался у нас в южных районах, но потом интерес овощеводов к нему пропал — как утверждают пожилые люди, помнящие вкус артишока, пропал совершенно неоправданно.

Движение тычинок у артишока напоминает ритуальный танец: при легком встряхивании цветка пыльники склоняются сначала друг к другу, затем в противоположные стороны; после этого тычинковая нить начинает быстро укорачиваться, и наружу выделяется капля жидкости, содержащей пыльцу. А поскольку причиной сотрясения цветка оказывается насекомое, естественно,

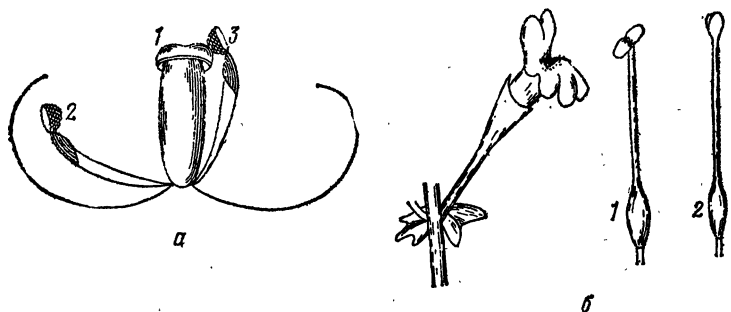


Рис. 31. Движение тычинок и пестиков: *а* — цветок барбариса: 1 — пестик; 2 — тычинка до раздражения; 3 — тычинка, поднимающаяся после раздражения; *б* — цветок мимулуса: 1 — лопасти пестика открыты; 2 — лопасти пестика закрыты после раздражения

ему нелегко пробраться мимо извивающихся тычинок, не обвалывшись как следует в этой жидкости... Так что назначение движений — вполне определенное.

Кстати, после оплодотворения тычиночные нити полностью утрачивают подвижность, хотя сам цветок продолжает развиваться.

Нечто подобное происходит и с тычинками подсолнуха, но их движения менее энергичны и вся картина не столь впечатляюща. Довольно быстро происходят движения тычинок у барбариса. В спокойном состоянии тычинки направлены в радиальном направлении, они прилегают к лепесткам цветка и образуют с пестиком прямой угол (рис. 31,а). Если осторожно прикоснуться к какой-либо из них, она быстро загнетса внутрь, а затем возвратится назад.

У некоторых растений способностью к движению при раздражении обладают и пестики. Здесь, правда, нам придется от хорошо знакомых растений перейти к обитателю кустарниковых зарослей Калифорнии, носящему название мимулус.

Рыльце его пестика снабжено лопастями, которые при раздражении закрываются (рис. 31,б). Поскольку раздражение чаще всего вызывается насекомыми — возможными переносчиками пыльцы, — закрытие рыльца лопастями ограждает занесенную пыльцу от механических воздействий и создает благоприятный режим для ее прорастания. Эти движения также довольно быстрые — пол-

ное соприкосновение лопастей происходит в среднем за одну минуту.

Впервые электрическую активность тычинок василька при возбуждении отметил Кабш в 1862 г. Обстоятельные исследования, выполненные впоследствии Умратом и Бюннингом на тычиночных нитях барбариса, позволили обнаружить потенциал действия, появляющийся при раздражении и предшествующий сгибанию тычиночной нити.

Очень убедительными оказались опыты, выполненные на цветке стилидиум. Две тычинки этого цветка срастаются вместе и располагаются под некоторым углом к пестику. После раскрытия пыльников оба органа приобретают способность к движению: при механическом воздействии сдвоенная тычинка и пестик склоняются друг к другу. Электрофизиологические исследования и здесь позволили выявить электрический характер возбуждения: потенциал действия распространяется от возбудимых клеток вдоль органа и вызывает реакцию клеток основания.

Подробности механизма управления подобными движениями лучше всего рассмотреть на примере опыта А. М. Синюхина и Е. А. Бритикова, изучавших распространение потенциала действия в двухлопастном рыльце цветка инкарвиллии при возбуждении. Наблюдаемая при этом картина сильно напоминает реакцию листа мимозы, которую мы рассматривали в предыдущем разделе.

Если кончик одной из лопастей механически раздражается, примерно через 0,2 секунды возникает потенциал действия, распространяющийся к основанию лопасти со скоростью 1,8 см/с. Спустя 0,8—1,0 секунды он достигает клеток, расположенных в месте сочленения лопастей, и вызывает их реакцию. Лопасты приходят в движение через 0,1 секунды после прихода электрического сигнала; закрытие длится 6—10 секунд. Примерно через 20 минут лопасты опять полностью раскрываются. Интересно отметить, что возникающий в лопасти при раздражении потенциал действия не передается по столбику вниз, к завязи.

На примере инкарвиллии легко убедиться, что электрические сигналы в виде потенциалов действия используются растением для управления не только механическими движениями органов, но и многими другими процессами. Продолжая опыты, А. М. Синюхин и Е. А. Бритиков обнаружили, что лопасты закрываются и после очень осторожного (не вызывающего механического раздражения) нанесения на них пыльцы. Известно, что пыльца оказыва-

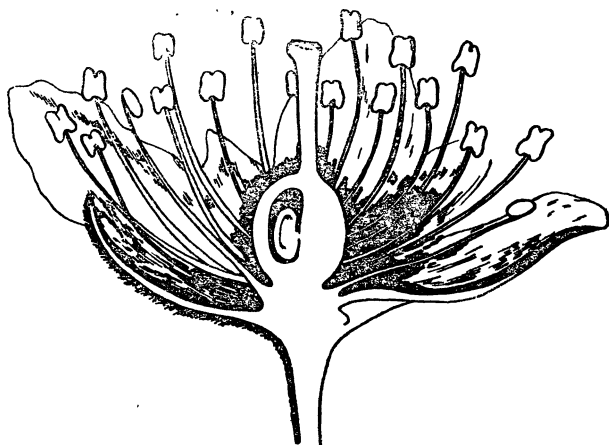


Рис. 32. Продольный срез отдельного цветка липы

ет сильное биохимическое воздействие на ткани рыльца пестика. Через несколько минут после нанесения пыльцы наблюдали закрытие лопастей; при этом возникал потенциал действия, распространившийся по столбику к завязи со скоростью около 3 см/с. В завязи этот сигнал вызывал резкое усиление дыхания — начался процесс оплодотворения.

Еще одна интереснейшая реакция многих цветков на механические раздражения, не связанная с видимыми движениями органов, — выделение нектара. Цветок липы, например, по которому ползает насекомое, начинает интенсивнее выделять нектар. В опыте, поставленном с целью обнаружения сопутствующих этому процессу электрических эффектов, один микроэлектрод вводился в ткань нектарника, другой — в проводящие пучки, обслуживающие нектарник (рис. 32). Оказалось, что при механическом раздражении некоторых частей цветка возникают электрические импульсы, передающиеся по железистым клеткам в проводящие пучки, и, достигая нектарника, стимулируют его деятельность.

Интересно отметить, что при этом усиливается не только отделение нектара, но и его образование в нектарнике. Реакция нектарника очень быстрая; выделение нектара начинается практически сразу после того, как насекомое садится на цветок. Пусть, добираясь до аппе-

титных капелек, оно лучше вымажет свои лапки и бока в пыльце...

Итак, можно сделать вывод, что электрическая передача возбуждения — явление не уникальное или исключительное. Оно характерно для жизнедеятельности многих представителей растительного царства. Естественно, напрашивается вопрос: может быть, такие же механизмы лежат в основе процессов, течение которых недоступно непосредственному наблюдению?

Возникнув перед исследователями конца прошлого — начала нынешнего века, этот вопрос почти сразу получил бесспорный ответ: да, существуют очень многие физиологические процессы, регулируемые с помощью электрических сигналов. Другое дело — определить масштабы этого механизма регулирования, степень его важности для отдельных функций растительного организма. Современное состояние этих вопросов далеко от полной ясности; тем не менее мы позволим себе упомянуть наиболее интересные результаты некоторых направлений исследований.

И. И. Гунаром и А. М. Синюхиным получены данные, свидетельствующие о том, что интенсивность одного из важнейших жизненных процессов растения — фотосинтеза — может регулироваться с помощью потенциалов действия определенного типа. В опыте с тыквой И. И. Гунар и А. М. Синюхин раздражали корневую систему и регистрировали распространение потенциалов действия в стебле, черешке листа и листе. Одновременно измерялась скорость поглощения листом углекислоты.

Оказалось, что волна потенциала действия передавалась из корня по стеблю и листовым черешкам к листьям, вызывая усиление или ослабление интенсивности процесса фотосинтеза. Характер реакции определялся видом раздражения. В том, что причиной реакции листа являлись именно электрические сигналы, можно убедиться, блокируя распространение потенциала действия вдоль стебля. Обработка участка стебля физиологически активными веществами 2,4-динитрофенолом, 2,4-Д и сильное охлаждение приводили к исчезновению всякой реакции фотосинтетического аппарата растения на раздражение корневой системы; известно, с другой стороны, что такого рода обработка создает непреодолимый барьер для распространения потенциала действия в стебле, но не препятствует нормальному восходящему и нисходящему движению веществ и воды по проводящим путям.

Подобные исследования описаны в ряде работ В. А. Опритова, изучавшего влияние раздражения надземных частей растения на другую важнейшую функцию растительного организма — поглощение корневой системой минеральных веществ из почвы. В одном из опытов верхушки проростков гороха раздражались несколькими способами — тепловым воздействием, раствором хлористого калия, гербицидом 2,4-Д и т. д. После каждого раздражения в стебле возникал и распространялся потенциал действия. Достигая корневой системы проростка, он вызывал изменение потенциала покоя и усиленное поглощение фосфора из питательного раствора. Важно отметить, что изменение поглотительной активности корня наступало примерно через одну минуту после раздражения верхушки; считается, что столь быстрая передача информации возможна только с помощью электрических сигналов (следует ведь еще учесть запаздывание реакции корня и некоторое минимальное время, необходимое для обнаружения начала интенсивного поглощения).

Другими опытами В. А. Опритова установлено, что биоэлектрические потенциалы играют важную роль в регуляции не только поглощения, но и перемещения ряда веществ (кальция, фосфатов, а также глюкозы) в растениях.

Как известно, газообмен листа осуществляется в основном через устьица — микроскопические щели, открытие и закрытие которых происходит в зависимости от температуры, влажности и физиологического состояния листа. Исследования Умрата показали, что закрытие устьиц листа фасоли может быть вызвано волной потенциала действия, возникающего при электрическом раздражении листа. Правда, более поздние попытки обнаружить электрическую возбудимость у замыкающих клеток устьиц успеха не имели. Возможно, электрическое раздражение вызывало некоторое изменение химизма процессов жизнедеятельности листа, в результате которого и происходило закрытие устьиц, а потенциал действия здесь совершенно ни при чем.

Вообще, в исследованиях подобного рода необходимо руководствоваться популярным среди юристов тезисом: «После не значит вследствие». Содержащееся в нем предостережение не всегда принимается во внимание, и именно поэтому иногда результаты публикаций о регуляторной

роли биоэлектрических потенциалов требуют осторожного отношения.

Главный источник неопределенности наших знаний об электрическом управлении жизненными процессами растения заключается в отсутствии каких бы то ни было представлений о самой системе сигнализации. Почему волна потенциала действия, исходящая из листа, в одном случае должна распространяться через стебель к корню, а в другом — через систему ветвей и побегов по всем листьям? Почему волна возбуждения, идущая из корня, в одном случае усиливает, в другом снижает интенсивность фотосинтеза, в одном случае действует на такой-то и такой процесс, в другом — на совершенно иной?

Каждая система связи предполагает некий механизм коммутации и определенный способ кодирования передаваемой информации. Если вы хотите, например, о чем-то попросить своего знакомого по телефону, вам следует прежде всего соединиться именно с его аппаратом и на известном ему языке изложить суть своей просьбы. Нам же почти ничего не известно ни о механизмах, направляющих сигнал от органа-отправителя к органу-адресату, ни о кодовых системах потенциалов действия. Мы располагаем лишь самыми общими сведениями о путях проведения потенциалов действия в растительном организме.

Пути распространения

По каким же тканям распространяется волна потенциала действия? Существует, впрочем, и еще один вопрос, возникающий в связи с явлениями, описанными в этой и предыдущей главах: каким образом передается потенциал действия от клетки к клетке?

Естественным будет начать наш рассказ с краткого ответа именно на последний вопрос.

Соприкасающиеся оболочки двух соседних клеток живой растительной ткани в некоторых местах как бы утончаются, причем таким образом, что утонченные участки располагаются друг против друга. Эти места не совсем точно называют порами, хотя на самом деле они не представляют собой единого сквозного отверстия, а лишь пронизаны многочисленными тончайшими канальцами. Каждый такой каналец заполнен тяжем протоплазмы, соединяющим протопласты двух соседних клеток; тяжи

называются плазмодесмами. Происхождение «пор» и плазмодесм до конца не выяснено: считается, что это остаточные образования так называемого ахроматинового веретена — плазматических тяжей, образующихся между ядрами двух клеток при их формировании после акта деления (рис. 33); правда, эта гипотеза встречает серьезные возражения.

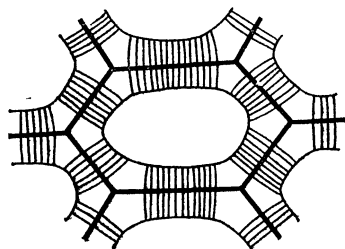


Рис. 33. Плазматические каналы, соединяющие соседние клетки — плазмодесмы

Таким образом, протопласты двух соседних клеток не полностью изолированы друг от друга, и электрическое возбуждение может свободно передаваться через плазмодесмы. Следует еще учесть, что у вытянутых клеток плазмодесмы сосредоточены главным образом в торцах, так что предпочтительная передача возбуждения должна осуществляться в продольном направлении.

Вернемся теперь к проблеме локализации проводящих электрический импульс тканей. Рассмотрим подробнее наиболее интересный случай — передачу электрического импульса в стебле или листовом черешке. Основные результаты здесь были получены все тем же неутомимым Д. Босом еще в начале века.

Работая с листовым черешком мимозы, Бос применил так называемый метод зонда. Его зонд представлял собой стальную иглу, погружение которой в ткань черешка регулировалось микрометрическим винтом (рис. 34, а). Поперечный срез листового черешка мимозы изображен на рис. 34, б; на нем можно различить пять элементов: эпидермис, или покровная ткань, кора, склеренхима — жесткая омертвевшая ткань, придающая прочность всей структуре, сосудистые пучки флоэмы (луба) и сердцевина.

Игла зонда вводилась все глубже и глубже в ткань черешка, при каждом ее положении черешок возбуждался и регистрировался электрический сигнал, воспринимаемый иглой. На начальных стадиях погружения иглы в ткань ответа либо не было вовсе, либо возникал электрический импульс очень незначительной силы, однако при более глубоком погружении регистрировалась волна потенциала действия. Сопоставляя данные о глубине погружения

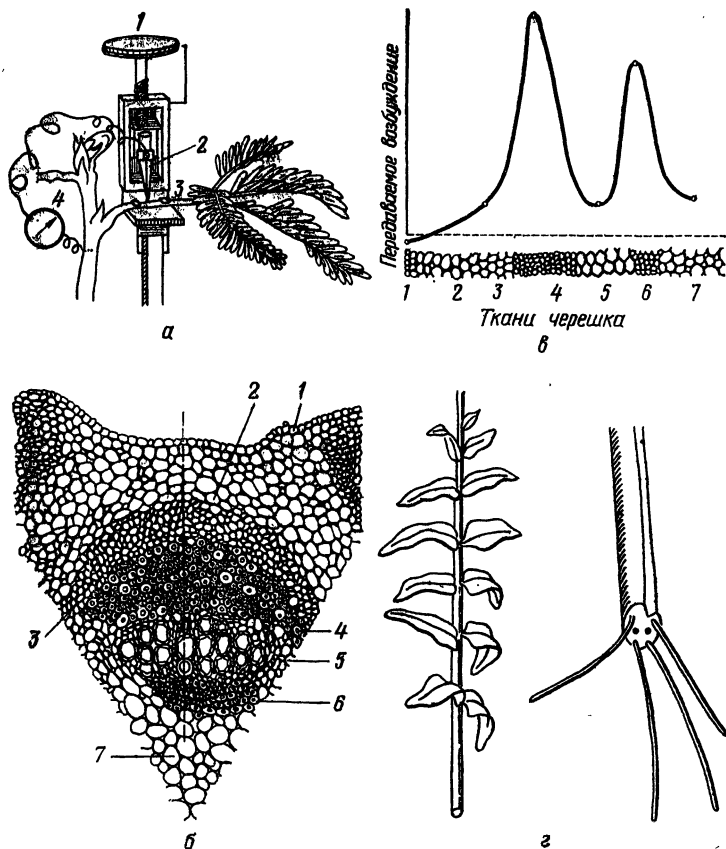


Рис. 34. Пути проведения потенциалов действия у высших растений: *а* — схема электрического зонда, разработанного Д. Босом: 1 — микрометрический винт; 2 — игла зонда; 3 — черешок мимозы; 4 — гальванометр;

б — поперечный срез черешка мимозы: 1 — эпидермис; 2 — кора; 3 — склеренхима; 4 — внешняя флоэма; 5 — ксилема; 6 — внутренняя флоэма; 7 — сердцевина; пунктиром обозначена линия погружения зонда;

в — величина регистрируемого электрического ответа в зависимости от глубины погружения зонда;

г — тяжи флоэмы в «листе» папоротника

зонда с результатами микроскопического анализа среза черешка, Бос установил, что проведение потенциала действия осуществляется через ткань главного сосудистого пучка — флоэму (рис. 34, в).

Более поздние исследования, выполненные под руководством И. И. Гунара в СССР и Т. Сибанокой в Японии, позволили детализировать картину, установленную Босом. Дело в том, что сосудистые пучки состоят по крайней мере из двух групп клеток: крупных ситовидных трубок и более мелких продолговатых паренхимных клеток. Было установлено, что основную роль в проведении электрического сигнала играет как раз последний тип клеток. Вспомним теперь описание механизма возникновения потенциала действия, приведенное в предыдущей главе; для того чтобы клетка могла генерировать потенциал действия, она должна быть заряжена отрицательно по отношению к окружающей ее ткани. Оказалось, что потенциал покоя чувствительных, проводящих возбуждение клеток существенно больше (по абсолютной величине) потенциала окружающих клеток, составляя около — 160 мВ. При прохождении волны потенциала действия в его пике эта величина резко снижается (у мимозы до — 20 мВ). Как мы помним, это в точности напоминает картину, наблюдаемую на аксоне или клетке харовой водоросли.

При удалении на значительном расстоянии ткани, окружающей проводящие пучки, электрическая волна свободно распространилась через отпрепарированный участок; однако при повреждении самих пучков проводимость полностью или почти полностью исчезает.

Впервые выделить и исследовать изолированные тяжи флоэмы удалось Босу; он работал с папоротником (рис. 34, г). Бос обнаружил, что тяжи имеют белый цвет, мягки и удивительно схожи с нервами животных не только по внешнему виду, но и по электрофизиологическим характеристикам.

Бос стал систематически использовать в своих сочинениях выражение «нервная система растений». Действительно, некоторая аналогия физиологических функций и физических свойств налицо. Тимирязев писал в свое время: «...если у растений подтвердится (предполагаемое некоторыми учеными) существование известных путей, по которым раздражение сообщается быстрее, чем по другим, то и в них придется признать нечто, по крайней мере физиологически, соответствующее нервам».

Конечно, не в названии дело. Кстати, сам термин «нерв» в ботанике вовсе не нов. До сравнительно недавнего времени так называли жилки листа, и система их расположения называлась «нерватурой». В зависимости от характера рисунка, образуемого жилками на поверхности листа, различают типы листьев — дугонервные, сетчатонервные, дланенервные и т. п.

В общем, слово используется в значении, полностью отличном от того, к которому мы привыкли, и никто ничего плохого в этом не видит.

В нашем случае дело обстояло иначе. Бос не ограничился использованием названий по аналогии (пусть даже весьма отдаленной). Он объявил, что в растениях и впрямь существует нервная система, во всех отношениях сходная с нервной системой животных! Бос утверждал, что он открыл у растений рефлексорную дугу, его последние работы (Бос умер в 1937 г.) пестрят заголовками типа «Рефлексорная дуга в мимозе и превращение эфферентного импульса в афферентный», «Отдельные проводящие нервы для сенсорного и моторного импульсов», в них постоянно фигурируют термины «синапс», «иннервация» и т. п. Большинство этих терминов применяется по очень отдаленной и сомнительной аналогии, результаты опытов — по-прежнему технически безукоризненных босовских опытов — трактуются несколько тенденциозно, и это «несколько» всегда направлено на доказательство более близкого сходства между нервной системой животных и системой передачи раздражения у растений. Бос стал пленником идеи полного стирания различий между растительным и животным миром в отношении устройства сенсорных органов.

О чувствах растений, пугливой драцене и детекторах лжи мистера Бакстера

«Глядя на каплю воды, аналитически мыслящий наблюдатель придет к выводу о существовании Тихого океана», — говаривал Шерлок Холмс. Надо думать, что в своей практической деятельности он не заходил так далеко по пути дедукции — иначе, несомненно, ему не удалось бы раскрыть ни одного преступления. Да и действительно, можно было бы задать великому сыщику вопрос, к какому выводу должен прийти аналитически

мыслящий наблюдатель, глядя на каплю, скажем, молока?

Но вот совершенно аналогичным образом, глядя на открытую у растений систему передачи раздражения, напоминающую по своим функциям и физической организации периферическую нервную систему животных, ботаники начала нашего века стали подумывать о существовании у растений центральной нервной системы и высшей нервной деятельности. Инициатива на сей раз исходила от немецких ботанических школ, представители которых еще недавно столь решительно отрицали саму идею чувствительности растительных тканей.

Чувствуют ли растения? Обладают ли растения сознанием? Есть ли, наконец, у растений душа? Все эти вопросы, казалось бы, вполне логически вытекают из факта существования у растений некоего подобия (пусть самого отдаленного) нервной ткани и нервной системы. Ибо если сходство в способе развития, химизме и важнейших жизненных отправлениях растительных и животных организмов действительно так велико, как утверждают ведущие биологи во главе с Дарвином, то у растений могут существовать некоторые зачатки высшей нервной деятельности.

Рискуя преждевременно выдать свое отношение к идеям подобного рода, мы тем не менее отметим, что авторы таких обобщений не очень затрудняли себя экспериментальной деятельностью или поисками конкретных аргументов. Поначалу это направление по-немецки называли сравнительно осторожным термином *Reizphysiologie* (физиология возбуждения), затем, набравшись храбрости, его представители стали именовать себя фитопсихологами.

В начале века возник подлинный бум деятельности «райцфизиологов» и фитопсихологов. Примером может служить небольшая книжка «Чувствуют ли растения?» немецкого профессора Р. Г. Франсэ, переведенная на русский язык в 1910 г. (популярное издательство А. Ф. Девриена).

Две трети книги не содержат никаких упоминаний ни о душе растения, ни об его умственных способностях и посвящены рассмотрению примеров раздражимости у растений.

Завершая эту часть книги описанием движений щупалец росянки, Франсэ заключает, что не остается ника-

ких сомнений в существовании феномена распространения возбуждения в растении, «так же как и в человеческом теле». Но в человеческом теле, как известно, для этой цели служат нервы, продолжает Франсэ, есть ли они также и у растений?

Ответ, который может дать наука на этот вопрос, по мнению автора книги, является «утвердительным, хотя и условным». Условным, потому что «нервы растений устроены во всяком случае иначе, чем нервы животных, будучи приспособленными к своеобразной жизни растительного тела».

Никаких искажений экспериментальных фактов или неоправданных выводов здесь пока нет. Франсэ раскрывает пути передачи возбуждений в тканях высших растений, в исследовании которых преуспел, кстати, упоминавшийся во второй главе чешский профессор Б. Немец, тот самый, который выделял золото из золы кукурузы. В отличие от Боса, Немец пользовался не электрическими измерениями, а микроскопическими методами, но пришел к очень близким выводам; в частности, он указал на проводящие пучки папоротника, как на канал передачи возбуждения от корня к листьям. Франсэ описывает эти опыты следующим образом: «...вдоль такого ряда клеток передается от каждой клетки к другой страшное известие: «наша общая глава — верхушка корня ранена».

Что же следует из всего этого для «аналитически мыслящего наблюдателя» шерлок-холмсовского типа? «Он чувствует побуждение сделать конечный вывод из существования у растений органов чувств и передачи раздражений, а этот вывод гласит: там, где есть различные проявления жизнедеятельности и раздражения, там должны быть и аппараты, которые их воспринимают и передают дальше. Но какой был бы смысл всех этих аппаратов передачи раздражений, если бы у растений не было чего-то, что могло бы воспринимать впечатления и использовать их?

Восприятие воздействий внешнего мира мы называем ощущениями, а использованием ощущений заведует нечто, в других случаях, за неимением более подходящего, обозначаемое словом «душа».

Далее Франсэ пишет, что «мы доходим до принципиального признания возможности существования психических отправления у растений... Поэтому нам не следовало бы слишком насмеяться над добрыми старыми психо-

догами дедовских времен, так чистосердечно и наивно писавшими убийственно длинные рассуждения о блаженстве цветов, об их желаниях и огорчениях, об их языке... В то время натурфилософия без всяких колебаний признавала существование души у растений, а один из выдающихся представителей этого умозрительного естествознания, придя с известной последовательностью к заключению, что существование души обуславливает собой бессмертие, написал даже прекрасное сочинение о бессмертии растений... Не скрывалось ли во всех этих преувеличениях более верное предчувствие истинной сущности природы, чем в не менее бессодержательных, но «точных» и потому сохранивших свою ценность схемах «настоящих» ботаников?»

Итак, постулат о душе, чувствах, сознании и т. п. растений звучит все увереннее. В самом предположении такого рода, вообще говоря, нет ничего ненаучного за исключением разве что использования терминов, не поддающихся точному определению. Но автор любой гипотезы, высказываемой априорно, должен найти аргументы, экспериментальные факты, подтверждающие ее. Но ничего подобного не увидишь у фитопсихологов. Франсэ, например, ограничивается обращением к одному-единственному и крайне малодоказательному опыту.

Опыт заключается в следующем. Растение мимозы везли по железной дороге в вагоне первого класса, который двигался очень плавно, почти без толчков. При очень редких толчках листья мимозы вздрагивали и опускались. В вагоне третьего класса, который трясло гораздо сильнее, листья мимозы были в непрерывном движении. Когда же растение вновь поместили в вагон первого класса, дрожание листьев прекратилось. «Ничего подобного вы не заметите нигде, где действуют одни только «механические силы», — заключает Франсэ.

Как видим, это, пожалуй, даже не целесообразно поставленный эксперимент, а случайное наблюдение — не лишнее, впрочем, интереса. И самое главное — оно не имеет никакого отношения к подтверждению тезиса о существовании у растений души, чувств и всего прочего! Что же до возможности создания механических адаптивных систем (а уж тем более электронных), то здесь автор, несомненно, ошибается, что можно доказать, используя примеры даже современной ему техники.

В заключительной части книги автор развивает свои построения чисто умозрительным путем: «Но можно ли при этом отрешиться от мысли, что раз растение ощущает, то оно может также чувствовать и боль? Какие чувствительные картины открываются тогда перед нами! Сколько страданий вносим мы, значит, бессознательно каждый день в природу? Мирная рубка леса оказывается в таком случае настоящим застенком, а каждый букет цветов куплен ценою сотни болезненных ран, нанесенных нами растениям».

Далее Франсэ пишет: «У растений наблюдаются известные проявления, которые можно объяснить, как реакции на болевые ощущения. Мы могли бы указать здесь на раздражение, вызываемое поранением растения... Когда Дарвин впервые попробовал раздражать кислотой чувствительную верхушку корня, то каждый раз вслед затем происходили сильные искривления всего корешка. Итак, не только червяк извивается, когда на него наступят, то же самое делает и корешок, если его сильно повредить... Все это сильно склоняет чашу весов в сторону положительного решения вопроса, участвуют ли цветы и деревья в этой бездне страданий, которую жизнь приносит с собой всему живущему. Мне кажется даже, что только полная непривычность и странность такого представления удерживает наших ученых от откровенного и смелого признания его».

В то же время автор подчеркивает, что он представитель умеренных кругов этого направления. Более радикально настроенные ученые, как, например, соотечественник Франсэ профессор Кернер, «безбоязненно говорят об инстинктах растений» (автор в известной мере симпатизирует этим взглядам), а «один из творцов современной ботаники, профессор Негэли, не колеблясь, признал существование у растений сознания, но он сильно обесценил свое признание тем, что гипотетически наделил психикой каждую молекулу белка».

По тону чувствуется, что Франсэ считает это за некоторый перегиб...

Мы так подробно рассмотрели книгу Франсэ, чтобы проиллюстрировать характер странной тенденции, возникшей в ботанике на рубеже прошлого и нашего столетия. При всей однозначности стиля и доводов такое направление не считалось в научных кругах экстравагантным. В России, например, глашатаями идей «райцифизологии»

и фитопсихологии оказались столпы официальной ботанической науки — академики Фаминцын, Бородин и Коржинский.

Упомянувшийся нами Ф. Кон писал в своей книге «Растение» (русский перевод 1901 г.): «... спросим себя, не искать ли зачатков духовной жизни уже в растительном царстве. Не прав ли был Аристотель, возводя душу в принцип всякой жизни, но признавая за растениями только те духовные силы, которые присущи деятельности питания и размножения, между тем как силы мысли и чувства у них отсутствуют? Нельзя ли сравнить эту душу в том виде, как она проявляется в рядах живых существ, с электрическим током, который только в совершенном механизме лампочки Эдисона дает подобный солнцу, далеко разливающийся свет, в других же аппаратах вызывает то яркое сияние проволоки, то едва заметное ее мерцание, а при отсутствии таких приборов едва колеблет магнитную стрелку без проявления света? Однако всюду ведь та же сила!»

В примечаниях к этой книге редактор перевода академик С. И. Коржинский добавляет: «Если бы Аристотелю была известна способность свободного перемещения к свету или пище зооспор водорослей и грибов, а также вызываемые раздражением движения мимоз и других растений, когда орган чувствующий часто значительно отдален от органа движения, то он не отрицал бы в душе растения силы чувствования и движения. Сознательное чувство, сознательную волю, конечно, нельзя признавать в движениях растений, хотя бы они на первый взгляд и напоминали их...»

Не следует, конечно, рассматривать сторонников фитопсихологии как невежественных обскурантов или сознательных обманщиков. И Фаминцын и Бородин имели значительные научные заслуги в ботанике, а Коржинский, наряду с де Фризом, считается первооткрывателем мутаций — явления скачкообразного изменения наследственных признаков, важнейшего понятия современной молекулярной биологии, генетики и эволюционной теории.

И все же большинство рационально мыслящих ученых сторонились этого течения. Некоторые делали это пассивно и осторожно, как, например, профессор В. Арциховский, автор книги «Раздражимость и органы чувств у растений» (СПб., 1912), завершающий свое сочинение

словами: «...я тщательно старался обходить вопрос о том, существует ли за своеобразной раздражимостью растительных организмов столь же своеобразная, хотя бы и весьма примитивная психика? Обходить этот интересный вопрос приходится потому, что при настоящем состоянии наших знаний он лежит всецело вне области научных исследований... Мы уже не станем удлинять нашей статьи экскурсиями в эту чуждую экспериментальному исследованию область знания».

Однако многие крупные ботаники того времени с полной откровенностью давали выход своему раздражению по поводу схоластических писаний фитопсихологов. Совершенно нетерпимо относился к ним, в частности, К. А. Тимирязев. В брошюре «Столетние итоги физиологии растений» и в последних изданиях «Жизни растения» содержатся его уничтожающие высказывания по поводу «всего того фантастического вздора об органах чувств и умственных способностях растений, о чем распространялись разные Франсэ и Немцы, а с их голоса — и наши молодые популяризаторы».

Говоря о появлении среди русских ботаников сторонников учения о психической деятельности растений, Тимирязев отмечал, что «в защиту этого воззрения не выставлено ни одного фактического довода. В пользу его... можно приводить только соображения метафизического, но не научного характера. Замечу также, что объяснить сравнительно немногочисленные явления растительной жизни простым уподоблением их несравненно более сложным явлениям психической жизни животных и человека — значит извращать тот логический ход, которым до сих пор двигалась наука, всякое знание».

Обратите внимание на почти точное сходство последней фразы с замечанием Визнера, полемизировавшего с Дарвином по поводу существования у растений явления раздражимости (стр. 78). Однако Визнер использовал этот (как выясняется, обоюдоострый) аргумент в безнадежной попытке противостоять лавинообразно нарастающему потоку экспериментальных фактов. Совершенно иная ситуация сложилась в полемике Тимирязева с фитопсихологами.

Тимирязев указывал, что фитопсихология не открыла новых фактов, а только пыталась приложить некоторые термины физиологии и психологии животных к описанию процессов раздражения у растений, причем по большей

части использовавшиеся аналогии оказывались весьма сомнительными.

Именно по этой причине тенденции такого толка начали хиреть сами собой, и после первой мировой войны о духовной жизни растений почти никто не вспоминал. Возможно, некие отголоски былых дискуссий на тему о существовании души у растений мы находим в романе К. Чапека «Война с саламандрами». Вот некоторые из вымышленных Чапеком ответов различных выдающихся личностей на анкету газеты «Дэйли Стар» на тему «Есть ли у саламандр душа?» (фантастических существ, обладающих интеллектом):

«У них есть душа, как есть она у каждого создания и каждого растения, как есть она у всего живущего. Велико таинство жизни».

Сандрабхарата Нат.

«Я никогда не видал саламандры; но уверен, что у созданий, не имеющих своей музыки, нет и души».

Тосканини.

И наконец, наиболее замечательный ответ вложил Чапек в уста Бернарда Шоу:

«Души у них, безусловно, нет. В этом они сходны с человеком».

Одним словом, здравый смысл и неумолимая логика научных фактов восторжествовали — нет никакой духовной жизни растений, а термин «фитопсихология» вспоминается только в трудах историков науки. Стремительный процесс идейного и методологического перевооружения, захвативший все отрасли биологической науки, казалось, не оставляет схоластам и мистикам ни места, ни шансов на общественное признание.

О духовной жизни растений лишь нет-нет вспомнят писатели-фантасты. В одной из новелл Дали рассказывается об изобретении прибора, с помощью которого удастся улавливать болевые ощущения срываемых цветов. А советский писатель Еремей Парнов именно на исследовании ощущений комнатного растения строит важный элемент сюжетной линии своего симпатичного романа «Третий глаз Шивы».

События в этом романе развиваются следующим образом. При подозрительных обстоятельствах умирает доктор химических наук Аркадий Викторович Ковский, заведующий лабораторией некоего НИИ. Расследование дела поручается старшему инспектору МУРа майору Люсину,

человеку исключительно приятному, деятельному и умеренно интеллигентному.

И вот в его разговоре с сестрой покойного выясняется одно крайне странное обстоятельство.

«— Видите ли, Владимир Константинович,— с усилием возвращаясь из своего далека, произнесла Людмила Викторовна,— Аркашенька открыл, что растения, все равно как мы с вами, чувствуют.

— Простите, не совсем понял.

— Что же здесь непонятного? Он доказал, что растения способны чувствовать и понимать. Когда их любят, ухаживают за ними, они радуются. Если их мучают,— страдают. Совсем как люди... Аркашенька присоединил к корням и листьям датчики, которые улавливают биопотенциалы, и вывел их на самописец... Они узнавали меня и Аркашеньку, реагировали на наше настроение... Растение все чувствует... Аркадий Викторович приступил потом к опытам любовь-ненависть и доказал это со всей очевидностью...

...Нет, эта женщина отнюдь не молола чепуху, как он было подумал вначале. Теперь он вспомнил, что два года назад прочел в английском журнале «Проблемы криминалистики» статью изобретателя детектора лжи Бекстера о его опытах с креветками и растениями... Все, что рассказывала Людмила Викторовна об экспериментах Ковского, было правдой. Она грешила против истины только тогда, когда незаслуженно приписывала брату чужие открытия...»

И действительно, дорогие читатели, существует американский специалист по детекторам лжи, советник нью-йоркской полиции Клив Бакстер, и действительно он многократно писал о своих опытах, как две капли воды похожих на опыты доктора Ковского. Автор «Третьего глаза Шивы» погрешил против истины только тогда, когда незаслуженно приписал Бакстеру чужие открытия: Бакстер не является изобретателем детектора лжи. Впрочем, это, конечно, не имеет значения, так же как и незначительная разница в написании фамилии.

Рассмотрим вкратце основные наблюдения, которые сделал Бакстер. Первое указание на существование телепатических возможностей растения было получено во время опыта с драценой, к которой подключали датчики биопотенциалов. Желая установить характер биоэлектрической реакции растения на ожог, Бакстер хотел было вы-

нуть из кармана зажигалку; но прежде чем он успел сделать какое-либо движение — панически задергался рычаг самописца, как если бы растение прочло его мысли!

Развивая свои исследования, Бакстер установил способность растений испытывать симпатии или антипатии к определенным людям или животным. Опыт заключался в том, что один из двух стоявших рядом филодендронов вырывали с корнем и ломали «на глазах» у другого. Если некоторое время спустя человек, сделавший это, приближался к оставшемуся растению, у того отмечалась энергичная биоэлектрическая реакция, не возникавшая, однако, при приближении другого человека.

Биопотенциалы растений реагируют на смерть живых существ, если она происходит вблизи растения. Например, если бросить в кипяток креветку, самописец, «подключенный» к растению, вычертит «зуб». Более того, примерно таким же образом растение чувствует даже смерть бактерий!

Общественность, интересующаяся науками, не могла, естественно, пройти мимо сенсационных открытий Бакстера. Тем более, что он сам активно и широко публиковал результаты своих опытов с обширными комментариями, а Питер Томпкинс и Кристофер Бэрд посвятили этим опытам значительную часть своей книги «Тайная жизнь растений». Как выяснилось, Бакстер не одинок в своих исследованиях. Американский инженер Совэн установил, что между человеком и растением может возникнуть определенная привязанность, после чего растение может безошибочно реагировать (изменением определенных биопотенциалов) на различные эмоциональные состояния хозяина, даже если он находится на удалении тысяч километров. Англичанин, доктор Бейли, проделал иной опыт. Два растения, растущие в разных оранжереях, продолжительный период не поливались. Если позже поливалось одно из растений, немедленно реагировала стрелка гальванометра, подключенного к другому.

В душе некоторых читателей, по-видимому, уже созрело раздражение: неужто есть люди, всерьез относящиеся ко всему этому. Ведь помимо «телепатического» канала связи, существование которого и у животных-то не удалось доказать, растениям приписывается способность к анализу сложнейших сигналов. Для того чтобы различить «убийцу» растения-соседа (помните опыт Бакстера?) сре-

ди других людей, с которыми у него больше признаков сходства, чем различия, нужно обладать далеко не простыми устройствами обработки информации.

Однако Бакстер идет еще дальше: «Эта способность восприятия, вероятно, не ограничивается клеточным уровнем. Возможно, ею обладают и молекулы, и атом, и даже его частицы. Наверное, нужно было бы заново изучить с этой точки зрения все то, что до сих пор принято считать неживым».

Бакстеру наверняка незнакома упоминавшаяся выше концепция Негэли. Не зря говорят, что новое — это только основательно позабытое старое. Позабыт, к сожалению, также и термин «фитопсихология» — он не вспоминается в связи с изысканиями Бакстера, Совэна и прочих. Возможно, в отличие от романтических и сторонящихся эксперимента фитопсихологов начала века их следовало бы называть неофитопсихологами?

Сочинения неофитопсихологов очень забавны в тех местах, где предпринимаются попытки сформулировать некую общую теорию. В самых причудливых сочетаниях применяются термины из физики, кибернетики, теории информации, ну и, конечно, термины совершенно оригинальные. («Для того чтобы понять что-либо в механизме этого восприятия, я думаю, необходимо привлечь квантовую механику» — Бакстер).

Неофитопсихолог в отличие от своего предшественника — фитопсихолога — несомненный экспериментатор. Как же обстоит дело с воспроизводимостью экспериментов?

Основное свойство опытов бакстеровского типа заключается в том, что они удаются только энтузиастам нового направления. Попытки всякого рода скептиков заранее обречены на провал. Более того, даже просто присутствие скептически настроенного специалиста при одном из опытов Бакстера сказалось крайне отрицательно: растения перестали реагировать на все внушения.

Позволим себе привести здесь цитату из повести Ф. Искандера «Созвездия козлотура»: «...правда, находились и завистники, которые жаловались, что гениальные эксперименты великого человека никто не может повторить. Жалобщикам вполне резонно отвечали, что эксперименты потому-то и гениальные, что их никто не может повторить».

Читатели «Литературной газеты» помнят, по-видимо-

му, подборку «Псевдонаука и ее жрецы» (от 28 августа 1974 г.). Помещенный в ней перевод статьи из французского журнала «Париматч», повествующей об опытах Бакстера, комментировал известный советский специалист в области электрофизиологии растений профессор И. И. Гунар, пытавшийся воспроизвести в своей лаборатории некоторые из этих опытов. Он пишет: «Мы попробовали воспроизвести их в своей лаборатории на значительно более чувствительной электрофизиологической аппаратуре, чем та, с которой работал Бакстер. В двух соседних сосудах стояли растения подсолнечника и мимозы. К одним из них были присоединены датчики приборов, другие растения в этот момент подрезались ножницами. Гальванометры никак не реагировали на наши «преступные» действия. Растения оставались безучастными к судьбе соседей-соплеменников. Потом кто-то из нас подошел ближе к сосуду с мимозой, подсоединенной к прибору. Стрелка качнулась...

Любой школьник, знакомый с азами электростатики, поймет, что это было отнюдь не чудо. Всякое способное проводить ток физическое тело или система тел обладает определенной электрической емкостью, которая меняется в зависимости от взаиморасположения объектов. Стрелка нашего гальванометра стояла неизбежно до тех пор, пока оставалась неизменной емкость системы. Но вот лаборант шагнул в сторону, и распределение электрических зарядов в системе нарушилось...»

Сообщений о подтверждении хотя бы одного бакстеровского эксперимента в профессиональной постановке нет и по сей день.

Глава 5. ЧТО ЖЕ ВСЕ-ТАКИ ДАЛЬШЕ?

Откровенно говоря, нам уже следовало бы распрощаться с читателем. Круг основных фактов, явлений и событий, имеющих непосредственное отношение к теме нашей книги, конечно же, далеко не ограничивается материалом, содержащимся в предыдущих четырех главах. Но ведь и книга эта не «Энциклопедия растительного электричества», а популярное введение в предмет...

С другой стороны, нам не хотелось бы заканчивать свое повествование описанием вещей может быть и занятых, но относящихся более к области схоластики и шарлатанства, чем науки. Занимательность занимательностью, полемика полемикой, но ведь не бакстеровские фантазии определяют лицо сегодняшней электрофизиологии растений. А самое главное — мы хотим еще раз напомнить читателю: несмотря на то, что в последние десятилетия исследования в этой области проводятся с исключительной интенсивностью, мы по-прежнему крайне мало знаем о механизмах и физиологической роли электрических процессов в растениях.

И если такие процессы (в чем уже почти нет сомнения) являются важной и неизбежной составляющей жизнедеятельности растительного организма, следовало бы задаться целью выяснить: что же они значат?

Как понять язык растений?

Можно снова воспользоваться аналогиями с «животной» электрофизиологией, имеющей богатый опыт регистрации, обработки и осмысления биопотенциалов различной природы. Например, электрические импульсы, управ-

ляющие сокращениями сердца, удается регистрировать с помощью сравнительно простой измерительной аппаратуры, причем форма этих сигналов — довольно сложная — зависит от того, насколько исправно функционируют различные участки сердечной мышцы. В каждой поликлинике есть электрокардиографический кабинет, и врач безошибочно определяет характер нарушений сердечной деятельности по форме кривой биоэлектрической активности.

Есть еще одна область физиологии и медицины, занимающаяся исследованием биопотенциалов, — электроэнцефалография. Она изучает электрическую активность головного мозга. Если электрокардиограммы расшифровать сравнительно просто, то хотя бы частичное осмысление записей электроэнцефалографа — дело необычайной трудности. Форма электроэнцефалограмм зависит от множества обстоятельств — степени усталости, характера психической деятельности, интенсивности различных физиологических процессов и т. д. Все эти влияния чрезвычайно сложны, и большая часть информации, содержащейся в электроэнцефалограмме, обычно остается непонятой. Тем не менее, сопоставляя изменения кривых с вызвавшими их факторами, зачастую удается установить интересные и полезные зависимости; так, например, с помощью электроэнцефалограмм удается обнаружить некоторые опухоли головного мозга и т. п.

Иными словами, даже не понимая механизмов возникновения и действия отдельных электрических импульсов, электрофизиологи научились «читать» электроэнцефалограммы хотя бы в первом приближении — так же как человек, лишь слабо знакомый с каким-нибудь иностранным языком, может тем не менее передать самый общий смысл прочитанного текста. «Разрешающая способность» такого распознавания невелика, теряются многие подробности, — может быть, очень важные и интересные, остается неуверенность и в отношении правильности самых общих выводов — но в конце концов и неполная расшифровка текста — лучше, чем ничего.

Отметим, что при подобном «переводе» (увы, очень хорошо знакомом многим из нас!) вовсе не обязательно руководствоваться интуицией, догадками и «озарением». Процедуры, очень близкие по своему существу, во многих случаях могут выполняться также и с помощью приемов вполне формальных, допускающих применение строгих

математических средств и, как следствие, использование ЭВМ.

Многие читатели, по-видимому, слышали о так называемой теории распознавания образов, средствами которой можно сличать друг с другом и классифицировать весьма сложные по своей структуре объекты даже без знания принципов организации этой структуры. Поясним идею такого подхода на простом примере.

Предположим, некто должен научиться различать тексты, написанные на английском языке, от текстов, написанных по-французски, не зная ни того, ни другого языка. Более того, ему не известен даже латинский алфавит, однако он имеет образец текста английского и французского.

Очевидно, ему нетрудно будет установить, что и тот и другой тексты написаны с использованием одинакового набора из двадцати с чем-то символов.

Как можно разрешить эту задачу с помощью чисто формальных приемов? Начнем с цифр, используя какой угодно способ их взаимного сопоставления, хотя бы так называемый «школьный код»: а — 1, в — 2, с — 3 и т. д. Как видим, код лишен какого-либо внутреннего смысла — да и откуда ему появиться, если мы даже не знаем латинского алфавита! Будем теперь вычислять цифровые характеристики текста — также совершенно бессмысленные: среднее значение произведения пары соседних символов, среднее их отношение — словом, все что придет в голову. А прийти может очень многое — ведь в таких характеристиках можно использовать комбинации из нескольких символов, соединенных разнообразными арифметическими операциями. И вот, вычислив для каждой странички — английской и французской — несколько сотен, тысяч или даже десятков тысяч такого рода бессмысленных характеристик, мы обнаружим, что чаще всего они очень близки, а в некоторых случаях — сильно различаются. Именно последние типы характеристик с указанием наблюдаемого различия (например, «для французского текста среднее значение символа около 12,4, для английского — 18,3», и т. п., цифры вымышленные) рассматриваются впредь как признаки, по которым возможна классификация незнакомых текстов.

Если, скажем, среднее значение символа неизвестного текста 17,9, то скорее всего это английский текст. Бес-

спорно, для некоторых характеристик такого рода различия могут оказаться случайными, присущими только эталонным текстам — но ведь мы позаботились о том, чтобы найти много разнообразных особенностей, различающихся в зависимости от языка, на котором написан исходный текст. И если убедительное большинство из них указывает на то, что испытываемый текст — английский, то скорее всего так оно и есть.

Все эти операции могут быть доверены вычислительной машине.

На методах, использующих идеи подобного рода, и базируется теория распознавания образов. С ее помощью удается «научить» ЭВМ читать буквы, написанные различным шрифтом, прогнозировать месторождения полезных ископаемых, ставить диагнозы при различных заболеваниях — одним словом, относить к той или иной категории объектов сложные, обладающие многими признаками образы.

Среди прочих достижений теории распознавания — неоспоримые заслуги в деле расшифровки электрокардиограмм и электроэнцефалограмм. Возможно, следует прибегнуть к ее помощи при изучении электрических сигналов в растениях?

В самом деле, общая картина электрической активности органов растения при определенном воздействии очень сложна, и если мы хотим (конечно, только для начала) научиться различать, какому именно воздействию, какому именно физиологическому состоянию соответствует данная совокупность результатов электрических измерений, обращение к методам теории распознавания образов кажется вполне естественным.

Разнообразная информация о физиологическом состоянии растения и протекающих в нем процессах, полученная на основе измерений различных типов биопотенциалов, может быть использована в прикладных исследованиях агрохимиками, селекционерами, мелиораторами. Например, обоснование режима агротехнических и мелиоративных мероприятий, обеспечивающих оптимальные условия произрастания культурных растений, теснейшим образом связано с разработкой простых и надежных методов контроля состояния растения. Кстати сказать, в исследованиях этого направления уже применялись методы теории распознавания образов, правда, вне связи с электрофизиологическими измерениями.

Впрочем, коль уж мы заговорили о так называемом «практическом выходе», остановимся на этой проблеме подробнее.

О практической пользе

Открытие электрических явлений в растениях немедленно породило целую плеяду «прибавленцев урожая». Например, журнал «Вестник русского сельского хозяйства» за 1889 г. буквально пестрел статьями о стимулировании роста сельскохозяйственных растений электрическим током. Вот результат опыта, выполненного А. Калантарем и А. Поповым, выращивавших редис в специальных ящиках, в торцах которых вставлены цинковые и медные пластинки и через почву пропускался электрический ток. «Электрические» растения дали по сравнению с контрольными 276% урожая листовой и 281% корневой массы. Да что там проценты — достаточно взглянуть на те и другие растения (рис. 35).

Вообще, читая русские сельскохозяйственные журналы конца прошлого века, можно прийти к заключению, что опыты с выращиванием редиса на электрогрядках или в электропарниках — излюбленное занятие агрономов того времени. Некто Л. Протопопов в статье «Опыт электрической культуры розового редиса» с восторгом пишет о том, как четырехнедельный редис, выращенный в «электрической культуре», был величиною с грецкий орех и мог употребляться в пищу, а контрольный едва достигал размеров горошины и в пищу, конечно, не годился.

В 1890 г. в журнале «Сад и огород» появляется статья И. Герасимова с описанием опытов доктора Манети. Манети электризовал грядки, на которых также выращивался редис; и конечно, в этих опытах электризация вышла редису на пользу: семена взошли уже на третий день (в контроле — на пятый), через месяц редис с электрогрядки годился в пищу, в то время как на контрольных растениях едва были заметны зачатки. Через некоторое время электроредис «достиг размеров громадной редьки, имея в диаметре более двух вершков (9 см). Редис другой гряды в то же время имел величину 1/2 вершка (около 2 см) в диаметре». Кроме того, редис, выращенный на электрогрядке, «имел самую нежную оболочку, вкус приятный, нежный, сочный и лишенный свойственной редису едкой горечи».



Рис. 35. Одно из этих растений редиски выращено А. Калантарем и А. Поповым на гальванизированной грядке, второе — на обыкновенной. Угадайте, которое именно?

В сборнике «Сельское хозяйство и лесоводство» за 1884 г. рассказано о выполненных в Австрии опытах по использованию методов электростимуляции в цветоводстве: «фуксии в шестимесячном возрасте были богаче цветами и годились на продажу, бегонии развивались роскошнее и были более устойчивы к внешним условиям, розы даже зимой имели такие же цветы и запах, как летом», и т. д.

В статье Эльпе «Опыты применения электричества к полеводству вообще и огородничеству в частности» (1889 г.) описываются опыты английских агрономов, показавших, что под действием электричества картофель и брюква дают заметную прибавку урожая — 15—20%.

Русский агроном Н. Н. Спешнев экспериментирует с многими культурами, электризуя не только почву, но и воздух — над растениями натягивается металлическая сетка (опыты подобного рода ставил еще Бертло). И снова наблюдается увеличение размеров редиса, моркови, урожаев овса, ячменя и т. п.

Тем временем появляются и скептики. Так, И. П. Петров, повторивший опыты с электризацией почвы, не обнаружил стимулирующего действия на рост редиса и салата; более того, в некоторых условиях электризация тормозила рост. Академик А. Фаминцын в 1890 г. повторил

опыты доктора Манети с редисом и горохом и не обнаружил разницы между «электрической и обыкновенною культурою».

По-видимому, шумиха, возникшая в конце 1880-х — начале 1890 гт. вокруг «электрической культуры растений», стала раздражать специалистов. Например, некий Богданов в статье, помещенной в «одной из лучших сельскохозяйственных газет» — «Земледелие» (от 6 июня 1889 г.), пренебрежительно называет электростимуляцию посевов «еще одним увлечением» и пишет, что «вообще едва ли даже есть необходимость заниматься дальнейшим изучением вопроса об электрической культуре, по крайней мере... что касается опытов действия гальванического тока на почву, занятую культурными растениями. Это потому, что электрическая культура только для наших хозяев представляет известного рода новинку. На Западе же, в Германии, Англии, Америке вопрос о ней поставлен вполне ясно, там более не увлекаются».

Далее следует какая-то странная и для нас малопонятная аргументация: «Нам нужны серьезные меры по облегчению тяжелого положения, созданного иноземной конкуренцией... а нас тешат игрушками: рекомендуют обратиться к электричеству, чтобы повысить урожай».

Одним словом, от модного новшества приходилось отбиваться всеми доступными средствами.

Мы не хотим, конечно, огульно упрекать всех авторов цитировавшихся выше работ в откровенном шарлатанстве, хотя некоторые из них, бесспорно, того заслуживают. Взять хотя бы того же доктора Манети, утверждающего, что редис, выращенный на гальванизируемой почве, имел диаметр в 4 раза больший, чем редис контрольный. Но, как показывает элементарный расчет, его вес должен быть большим в 4^3 — в 64 раза.

Неспроста А. Фаминцын отнесся с недоверием к опытам почтенного доктора.

Как известно, электростимуляция роста растений так и не нашла повсеместного применения в сельскохозяйственной практике, хотя некоторый положительный эффект пропускания электрического тока через почву или растение в ряде опытов, несомненно, достигался. Среди работ более позднего времени стоит упомянуть опыты И. В. Мичурина по влиянию электрического тока на прорастание гибридных семян. Как выяснилось, пропускание тока определенной силы через почву, в которой выра-

щивались сеянцы, ускоряло их рост и улучшало качество посевного материала.

Из опытов по воздействию атмосферного электричества на растения следует назвать выполненные в 20-х годах серьезные исследования англичанина Блэкмана и его школы. Их работами было установлено, что в некоторых случаях наблюдается благоприятное действие электрического поля на рост растений, хотя нередко отмечается также и угнетающее его влияние.

Известный интерес к проблеме электрического стимулирования роста и развития растений сохранился и до настоящего времени; изредка в печати появляются сообщения на эту тему. Сравнительно недавно упоминалось, например, об ускорении процесса созревания томатов под влиянием электрического поля («Природа», 1965, № 1). В последнее время проверкой разноречивых результатов исследователей прошлых лет занялась группа канадских ученых. Их данные получены современными методами в хорошо продуманных экспериментах. Выяснилось, что, пропуская ток через стебель растения, можно не только увеличить линейный рост побегов (на 5—30%), но и заметно усилить поглощение растением элементов минерального питания — калия, кальция, фосфатов. При этом характер действия существенно зависел от направления прилагаемого тока. Несомненно, что электрическое стимулирование оказывает влияние и на распределение в органах растения фитогормонов — веществ, регулирующих ростовые процессы.

Исследования, выполненные в Институте физиологии растений АН СССР, показали, что разность электрических потенциалов между почвой и атмосферой заметно влияет на интенсивность фотосинтеза: чем более отрицательно заряжена почва по отношению к атмосфере, тем выше интенсивность фотосинтеза. При подаче на растение положительного потенциала интенсивность фотосинтеза медленно падает.

Пока ничего не известно о механизмах, лежащих в основе этого явления. К сожалению, до сих пор не удалось также установить характер действия «внешнего» электричества на электрические процессы, происходящие в самом растении.

Определенные возможности открывает использование электрофизиологических измерений для селекции и диагностики состояния растений. Уже давно отмечено, что

электрические свойства растительных тканей заметно разнятся в зависимости от устойчивости растений к холоду. На этой их особенности основан ряд методов селекции культурных растений на морозостойкость.

Дело в том, что при выведении зимостойких сортов озимых культур селекционеру необходимы надежные способы оценки степени зимостойкости. Существующие прямые методы испытания зимостойкости заключаются в промораживании испытуемых растений в специальных холодильных камерах. Эти методы трудоемки и связаны с гибелью растений. Другие методы — биохимические — трудоемки еще более и требуют много растительного материала. Легко понять преимущества электрических методов определения зимостойкости, заключающихся в самых простых измерительных процедурах на живом, неповрежденном растении.

Устойчивость растений ко многим повреждающим факторам, прежде всего к действию высоких и низких температур, оценивается некоторыми характерными физиологическими и биохимическими особенностями. В первую очередь следует назвать повышенную концентрацию электролитов и неэлектролитов в клеточном соке, а также измененную реакцию на раздражение протоплазматических структур клетки, и прежде всего мембран, ответственных, как мы знаем, за ионные потоки и формирование биоэлектрических потенциалов. Благодаря этому многие электрические характеристики клеток и тканей могут оказаться хорошими показателями степени устойчивости растения. На этой основе удалось создать ряд эффективных методов испытания.

Таков, например, предложенный в свое время Н. П. Никитиным прием, позволяющий определять морозостойкость злаковых растений в ранние периоды их развития (при введении электропары в ткань стебля регистрируемая величина потенциала тем выше, чем больше морозостойкость растения).

Аналогично было установлено, что электрическое сопротивление проростков или определенных участков стебля злаковых тем выше, чем больше их зимостойкость. Помимо этого, в зависимости от степени зимостойкости заметно различаются электрические реакции растения на всевозможные раздражения.

В последнее время разработкой методов выявления морозостойкости растений на ранних этапах развития с

помощью электрофизиологических измерений занимаются многие научные коллективы; в частности, большая работа проделана в лаборатории искусственного климата Тимирязевской сельскохозяйственной академии.

Например, изучались биоэлектрические ответы проростков некоторых сортов озимых культур при различных температурных воздействиях. Как оказалось, после нагрева или охлаждения корневой системы проростков озимой пшеницы через 5—20 секунд возникает потенциал действия, амплитуда которого тем больше, чем менее зимостойким является испытуемый сорт.

Более того, дальнейшие исследования показали, что на основе подобных измерений можно составить вполне надежное суждение и о жаростойкости растения; это было показано в работе И. И. Гунара, Л. А. Паничкина и А. П. Маслова. Амплитуда ответной реакции на температурное раздражение у жаростойких сортов ячменя (Южный, Донецкий 4) оказалась в три раза меньшей, чем у нежаростойких (Московский 121, Винер).

Злаковые культуры не единственно возможные объекты для подобных испытаний; описанный метод может с успехом применяться при селекции ряда других культур. Например, он оказался весьма эффективным при оценке холодостойкости огурцов.

Однако наибольшее распространение получили электрофизиологические методы при оценке зимостойкости древесных пород. По техническому исполнению они достаточно просты. Например, один отводящий электрод помещается у основания верхушечной почки побега, другой — у основания нижележащей почки. Через другую пару электродов подводится раздражающий импульс электрического тока.

По величине электрического ответа зимостойкие и незимостойкие деревья различаются довольно резко. Так, у зимостойких черемухи, липы, березы величина ответа составляет 40—60 мВ, у незимостойких — яблони, лещины — 80—90 мВ. Эти различия еще более заметны осенью, в середине и конце сентября, когда зимостойкие породы переходят в состояние «глубокого» покоя. В начале зимы биоэлектрические ответы зимостойких растений на раздражение импульсом тока составляют всего 10—15 мВ, а незимостойких сохраняются довольно высокими — 30—40 мВ.

Электрофизиологические методы диагностики могут использоваться не только в селекции; известны сообщения, что с их помощью можно осуществлять контроль качества приживаемости саженцев деревьев (у хорошо прижившихся саженцев большая амплитуда ответа на электрическое раздражение) или оценивать эффективность обработки деревьев стимуляторами роста.

В последнее время удалось существенно усовершенствовать методику подобных измерений; в частности, введен в практику селекционной работы так называемый бесконтактный метод регистрации биоэлектрических потенциалов. Основное его отличие от существующих методов заключается в том, что контакт с тканью устанавливается через ионизированный воздух. В результате исключаются сложные манипуляции по введению электродов и эффекты повреждения тканей. В то же время этот метод гарантирует высокую чувствительность и хорошую стабильность регистрации.

Интересные возможности открываются для использования биоэлектрической реакции клеток растений (прежде всего водорослей) в системах испытания биологической активности различных химических соединений. В наши дни эта проблема стоит очень остро по многим причинам. Ежегодно синтезируются десятки тысяч биологически активных веществ: химики упорно ищут новые фармацевтические средства, гербициды, инсектициды и т. п. Эти соединения приходится испытывать в системе достаточно сложных тестов: каждый рекомендуемый к употреблению препарат, обладая «искомым» видом активности, не должен в то же время давать нежелательных побочных эффектов. Скажем, новый гербицид может быть допущен к массовому употреблению только после того, как будет доказана его абсолютная безвредность для людей и животных, охраняемых от сорняков культурных растений и т. п.

С другой стороны, известно, что часто действие физиологически активных соединений на клетку (как животную, так и растительную) связано с модификацией свойств клеточных мембран, из-за чего, очевидно, могут измениться и биоэлектрические характеристики клетки. Например, изменение проницаемости мембраны по отношению к различным ионам немедленно скажется на ее электрическом сопротивлении и потенциале покоя, а также и на характе-

ристик потенциал действия — форме волны, ее скорости и т. д.

Соединения, влияющие на клетку по такому механизму, называют физиологически активными веществами мембранотропного действия. Не будет, по-видимому, преувеличением сказать, что к таким соединениям относится большая часть важнейших классов биологически активных веществ.

Как мы уже писали, регистрация биоэлектрических характеристик клеток ряда водорослей может производиться с высокой точностью на протяжении значительных промежутков времени. Это делает их особенно ценными для исследования мембранотропного эффекта различных химических соединений. Мы упоминали, что молекулярная структура и многие свойства клеточных мембран животных и растительных клеток довольно близки, так что возможна по крайней мере предварительная классификация ожидаемого эффекта на основе данных тестирования, выполненного на клетках водорослей. Добавим также, что такой способ тестирования выгодно отличается от подавляющего большинства других тем, что он позволяет получить развернутую характеристику мембранотропного эффекта — изменение проницаемости к отдельным ионам, изменение характеристик потенциал действия и т. д. Тем самым он оказывается более информативным по сравнению с методами, в которых используется более грубая реакция тестового объекта (иногда это просто гибель тестового организма в растворе некоторой «пороговой» концентрации испытуемого соединения).

Наконец, биоэлектрическая реакция клеток водоросли на присутствие в среде многих биологически активных веществ чрезвычайно высока; иногда она может «чувствовать» концентрации порядка 10^{-8} моля.

С этой особенностью связана еще одна интересная возможность использования «водорослей-электроиндикаторов» — для тестирования загрязнения водоемов. Многие загрязнители — органические вещества — токсичны для обитателей водоемов даже в очень незначительных концентрациях. Практически их нельзя обнаружить химическими методами именно из-за малых концентраций. Они могут накапливаться в течение длительного времени и проявить свое присутствие лишь тогда, когда в животном и растительном мире водоема наступят заметные — часто необратимые — сдвиги. Поэтому чрезвычайно остро стоит

проблема ранней диагностики опасных загрязнений, и электроальгологический анализ во многих случаях оказывается единственным средством индикации.

Существуют, впрочем, и другие возможности «практического использования» электрических явлений в растениях. В июле 1977 г. в Лондоне состоялся так называемый фестиваль «Мысли и Тела», который газеты назвали «культурно-торговым мероприятием», а организаторы фестиваля — «признаком новой эпохи». Участникам предлагали приобрести (по цене несколько десятков долларов за штуку) «калькулятор биоритмов», «вегетарианскую губную помаду» и «транслятор биологической активности». Последнее устройство представляло собой некий электронный прибор, позволяющий, как утверждал продавец, подслушивать разговоры растений. «Растение, — говорил он, — издает мелодичные звуки, но немедленно замолкает, если ему пригрозить обрезать лист. Поставьте его у себя дома, где никто не будет над ним издеваться, и вы немедленно почувствуете (конечно, с помощью чудодейственного «транслятора») изменение в его настроении!»

Говоря о «практической пользе» растительного электричества, нужно все же сознаться: пока что она невелика, и дальнейшее нагромождение примеров выглядело бы попыткой оправдать «деловыми мотивами» наш интерес к явлениям, описанным в этой книге.

В одной из своих статей К. А. Тимирязев приводит цитату из речи английского химика Армстронга на сессии Британской Ассоциации науки в 1914 г.: «Еще недалеко то время, когда научное исследование встречалось вопросом *si: homo* — на какой прок? Теперь скорее можно надоесть... бесконечным перечнем того, что дала наука человечеству, и, заметим, благодаря не только изобретателю, как обыкновенно думают, но именно исследователю. Начало той власти над электричеством, которая так характеризует современную жизнь, можно в значительной мере проследить по тесной, плохо освещенной лаборатории в Британском институте, где работал Фарадей, имея в виду только одну цель — расширение знаний».

И коль уж скоро мы упомянули имя Фарадея, позволим себе напомнить незначительный, но тем не менее достаточно известный факт его биографии. На одной из публичных лекций Фарадея по электричеству присутствовал министр Гладстон.

По окончании лекции он задал сакраментальный вопрос:

— Какую практическую пользу принесут ваши открытия?

— Этого я еще не знаю,— ответил Фарадей,— но могу вас уверить, что через непродолжительное время вы будете взимать за это налоги.

Если говорить о «растительном электричестве», у нас нет прямых оснований для такого же уверенного предсказания ему блестящей карьеры в сфере практического использования, — хотя это вовсе и не исключено. И на вопрос: «Почему и, главное, зачем нужно исследовать электрические явления в растениях?», лучше ответить откровенно: «Поскольку все это очень интересно».

Разговор о перспективах электрофизиологических исследований на растениях, который мы начали в этой главе, получился фрагментарным. Далеко не все удастся предвидеть, да и объять необъятное, как известно, нельзя.

Но вот по одному очень важному поводу мы хотели бы сделать несколько замечаний. Мы подчеркивали, что в описаниях физико-химических процессов, происходящих в клетке, нам удалось избежать формул и всякой математики. Однако не будем скрывать, что по мере написания этой книги такая установка казалась нам все более неудобной.

Ибо в чем более всего нуждается ныне электрофизиология растительных клеток и тканей, так это в тщательном и квалифицированном переводе описания основных явлений и процессов на язык физики, с чем неизбежно связана формализация (т. е. математизация) такого описания. Эра биологии романтической уходит бесповоротно, уступая натиску биологии точной.

Поэтому когда приходится слышать горестные сетования коллег-биологов на растущее засилье в нашем деле физиков, химиков, инженеров и математиков, на то, что статьи в биологических журналах становятся все более непонятными — поневоле приходит на ум история, рассказанная известным чешским сатириком XIX в. Карелом Гавличком-Боровским. Посетив в середине прошлого века Москву, Гавличек присутствовал в Московском университете на экзамене по чешскому языку. С восторгом отмечая высокий уровень подготовки студентов, он заключает свое сообщение об этом визите словами:

«Много выводов и моральных поучений можно было бы сделать из этого события, но мне больше всего хочется сказать вам следующее: если вы, господа на Влтаве и Эльбе, на Мораве и Гроне, не хотите учить ваш родной язык, за вас будут изучать его в Париже, в Берлине, в Москве и, может быть, скоро в Пекине, и оттуда через сто лет придут к вам, богемцы, учить вас чешскому правописанию».

Как известно, мрачные прогнозы Гавличка не оправдались; будем и мы надеяться, что с переходом биологии в разряд «сравнительно точных наук» ученые сохраняют способность понимать язык родной науки, — другое дело, что в лексиконе этого языка напрочно воцарятся, помимо

прочих, также и выглядящие ныне варварски неуместными термины типа «лапласиан» или «каскадный усилитель».

Итак, полностью освободив текст нашей книги не только от формул, но и (по возможности) от элементов профессионального жаргона, мы, по-видимому, оказали медвежью услугу той части читателей, которая желала бы углубить знакомство с проблемами, о которых шла речь. Попытаемся возместить это рекомендацией основной литературы, наиболее подходящей для этой цели.

Советуем прежде всего ознакомиться со статьей Б. Скотта «Электричество в растениях». Статья эта помещена в книге «Структура и функция клетки» (М., «Мир», 1964) — сборнике переводов из американского научно-популярного издания «Сайентифик Эмерикен». В частности, в ней описываются опыты автора по наблюдению за электрическим полем кончика корня.

Книга А. Гизе «Физиология клетки» (М., ИЛ, 1959) формально не относится к научно-популярной литературе, однако простота и ясность изложения делает ее доступной читателю-неспециалисту. Она хороша также в качестве справочного пособия по многим вопросам, обсуждавшимся выше.

Читателю, интересующемуся главным образом математической теорией процессов, происходящих на биологических мембранах, следует обратить внимание на книгу В. С. Маркина и Ю. А. Чизмаджева «Индукцированный ионный транспорт» (М., «Наука», 1975). Конечно, ее чтение требует определенной физико-математической подготовки.

Совсем недавно вышла в русском переводе книга Д. Кларксона «Транспорт ионов и структура растительной клетки» (М., «Мир», 1978), представляющая собой добротное и очень современное введение в интересующие нас разделы физиологии и биофизики растений.

К сожалению, в последнее время на русском языке не появлялись какие-либо обобщающие работы, посвященные физиологии насекомыхных растений. Однако обзор Н. Г. Холодного на эту тему, хотя и был написан сорок лет назад, и по сей день представляет собой достаточно добротное введение в проблему. Его можно найти в 7-м томе «Избранных трудов» Ч. Дарвина (М., 1938), где он помещен в качестве комментария, или в «Избранных

трудах» Н. Г. Холодного (т. 3, с. 452. Киев, АН УССР, 1957).

Наконец, мы рекомендуем читателям познакомиться с оригинальными работами Дж. Ч. Боса, изданными в серии «Классики науки» в двух томах (М., «Наука», 1964). Если работы, помещенные в первом томе, действительно можно отнести к числу классических исследований раздражимости растений, то публикации, содержащиеся во втором, носят бесспорный отпечаток поздних увлечений Боса фитопсихологией, о чем мы уже упоминали. Впрочем, элементы, привнесенные этим увлечением, легко отделить. Помимо множества интересных фактов, в трудах Боса привлекает яркий стиль и нестандартная логика; во втором томе приводятся обширные биографические сведения об авторе.

Продолжение этого перечня требовало бы упоминания работ весьма специальных; впрочем, осилив даже часть названных публикаций, вы сможете определить стратегию своего дальнейшего чтения.

Прощаясь с читателем, мы хотим выразить свои симпатии тем из них, которые, прочитав нашу книгу, воспользуются этими краткими библиографическими рекомендациями.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Электричество в растениях	6
Напряжение — 0,1 вольта	9
Электрический элемент — растительная клетка	15
Один электрод вводится внутрь клетки	23
Попробуем разобраться	26
Ботаник не боится трудностей	31
Глава 2. Ионные насосы	39
Растения-алхимики, растения-геологи и золото из морской воды	39
Очень странный факт	51
Глава 3. Кое-что о растениях-хищниках	58
Орхидея, пощади!	58
Чарльз Дарвин и холодный разум немецких исследователей	71
Карикатура нервной клетки	81
Помехоустойчивая мухоловка	88
Глава 4. Электрическая сигнализация растений	93
Электромиоза	93
Потенциал действия у высших растений	102
Пути распространения	110
О чувствах растений, пугливой драцене и детекторах лжи мистера Бакстера	114
Глава 5. Что же все-таки дальше?	126
Как понять язык растений?	126
О практической пользе	130
Просто интересно	140

Станислав Геннадиевич Галактионов
Владимир Михайлович Юрин

БОТАНИКИ С ГАЛЬВАНОМЕТРОМ

Зав. редакцией научно-художественной
литературы **М. Новиков**
Редактор **В. Климачева**
Художник **М. Дорохов**
Мл. редактор **В. Саморига**
Техн. редактор **Л. Кирякова**
Корректор **А. Пузакова**

ИБ № 1309

Сдано в набор 20.12.78 г. Подписано к печати 21.02.79 г.
Формат 84×108^{1/32}. Бумага тип. №1. Гарнитура обычнов.
новая. А 08936. Печать высокая. Бум. л. 2,25. Печ. л. 4,5. Усл.
печ. л. 7,56. Уч.-изд. л. 7,66. Тираж 100 000 экз. Изд. № 272.
Заказ 1119. Цена 30 коп. Издательство «Знание», 101835, ГСП,
Москва, Центр, проезд Серова, д. 4.

Киевская книжная фабрика республиканского производствен-
ного объединения «Полиграфкнига» Госкомиздата УССР,
Киев, ул. Воровского, 24,