

ЕСТЬ ЛИ У РАСТЕНИЙ НЕРВЫ?

Кирилл СТАСЕВИЧ.

Нервов у растений нет — во всяком случае, в том виде, в каком они есть у животных. Ведь что такое нерв? Это пучок нервных клеток, или, если говорить точнее, пучок аксонов — так называют длинные отростки нервных клеток. А нужны они для того, чтобы очень быстро передавать информацию в виде электрохимических импульсов на большие расстояния — от рецепторов к мозгу, от мозга к мышцам, от одного органа к другому. Именно благодаря нервным клеткам мы мгновенно чувствуем жжение, когда касаемся чего-то горячего, и благодаря им же сразу отдёргиваем руку — нейроны передают соответствующий сигнал мышцам. Но растения ведь так себя не ведут. Мы бы сильно удивились, если бы дерево вдруг резво отскочило от огня.

Однако на свете есть растения, которые могут двигаться не по-растительному быстро. Самые известные из них — венерина мухоловка и мимоза стыдливая. Венерина мухоловка — хищное растение, питающееся мелкими беспозвоночными. Насекомое, паук или какая-нибудь мокрица заползают в ловушку из листьев, которая выглядит как зубастая пасть. Мухоловка чувствует, что в ловушку кто-то попался, и захлопывает её — на это у неё уходят десятые доли секунды. Есть и другие плотоядные расте-

ния, способные к быстрым движениям: росянка и пузырчатка.

А вот мимоза стыдливая — совсем не хищная. Она быстро сворачивает и опускает листья в ответ на прикосновение, а когда её продолжает что-то тревожить, у листа ломается черешок — если на листе была, например, гусеница, она упадёт вместе с листом. Кроме мимозы, быстро вертеть листьями может азиатский кустарник *Codariocalyx motorius*, который называют телеграфным, семафорным или танцующим растением. Его листья тоже достаточно быстро двигаются на своих черешках, хотя до сих пор непонятно, почему они это делают: кто-то говорит, что растение пытается таким образом поймать больше света, кто-то — что движущиеся листья имитируют крылья бабочек, чтобы настоящие бабочки не откладывали на них яйца.

Очевидно, что у венериной мухоловки, мимозы и других быстро движущихся растений есть что-то вроде осязания: они чувствуют, когда до них дотрагиваются, и этот сенсорный сигнал быстро превращается в двигательную команду. Всё выглядит так, будто у них всё-таки есть нервы — или что-то, что выполняет их функцию.

Как бы ни выглядели растительные нервы, в главном они должны быть похожи на наши. Вспомним, как работают нейроны. Отростки нервных клеток у животных можно уподобить полым кабелям, у которых в наружных мембранных стенках есть ионные каналы — специальные белки, управляющие потоком положительных и отрицательных ионов. При электрическом импульсе ионы по обе стороны мембраны перегруппировываются благодаря ионным каналам и электрические свойства мембраны на короткое время меняются. Первоначально

● **БИОЛОГИЧЕСКИЕ БЕСЕДЫ**

это происходит на небольшом участке мембраны, но те ионные каналы, которые находятся рядом, чувствуют изменения и тоже начинают открываться и закрываться. В результате изменённое состояние распространяется по всей длине нейронного отростка — электрохимический импульс «бежит» от одной клетки к другой.

Начинается всё с того, что к нейрону приходят сигналы от другого нейрона: передающий нейрон через межнейронный контакт-синапс посылает принимающему нейрону вещества-нейромедиаторы (дофамин, серотонин, ацетилхолин и др.). Нейромедиаторы действуют на ионные каналы принимающего нейрона, возбуждая в нём импульс. Или же нейрон сам по себе чувствует какой-то внешний стимул — например, физическое давление или запаховую молекулу, или что-нибудь ещё. Так ведут себя рецепторные нейроны: специальные сенсорные белки в них начинают перегруппировку ионов, потом в дело включаются другие ионные каналы.

Есть много разных белков, которые управляют потоками ионов в нейронах: они поддерживают нейрон в рабочем состоянии, запускают импульс, помогают нейрону отдохнуть после импульса и т. д. В двух словах их работу не опишешь.

Но нам это и не надо. Для нас главное, что для нервного импульса нужна мембрана с разными электрическими зарядами на наружной и внутренней стороне — или, говоря иначе, с разностью электрических потенциалов. Ещё нужно, чтобы мембранные заряды менялись и чтобы эти изменения не ограничивались крохотным участком мембраны, а быстро распространялись на более или менее далёкое расстояние, хотя бы на несколько сантиметров. И чтобы в ответ на электро-



Фото: Noah Elhardt/Wikimedia Commons/CC BY-SA 2.5

Ловушка венериной мухоловки. Внутри видны чувствительные волоски, которые дают команду закрыться.



Фото: Sten/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0

Мимоза стыдливая. Посередине — сложный перистый лист, чьи «перья» свернулись после прикосновения.

химический импульс с растением что-нибудь происходило.

Разность потенциалов на мембране есть почти у всех клеток, растительные тут не исключение. Ещё в XIX веке удалось установить, что растения этой разностью потенциалов пользуются — в них появляются электрические импульсы, которые распространяются по растительным

тканям. Любопытно, что исследования здесь начались с подачи Чарльза Дарвина, который много размышлял над умением венериной мухоловки быстро захлопывать свою листовенную пасть.

Возможно, от двигающихся растений, вроде мимозы и плотоядной мухоловки, и можно было ожидать, что они используют быстрые электрические импульсы. Но оказалось, что электрохимическими сигналами пользуются и обычные растения — от некоторых водорослей до хорошо нам знакомых алоэ и томатов. Эти сигналы распространяются у них медленнее, чем у животных: если у животных скорость нейронного импульса обычно равна десяткам метров в секунду, то у растений электрохимический сигнал «бежит» в среднем не быстрее нескольких сантиметров в секунду (хотя венерина мухоловка отличилась и тут — у неё сигнал в ловушке распространяется со скоростью 10 м/с). Некоторые из таких сигналов по физиологическим свойствам очень похожи на импульсы животных. Другие виды сигналов присущи только растениям, у животных аналогов им нет.

Когда у растений возникают электрические сигналы и зачем они им нужны?

В случае мимозы стыдливой всё понятно, в случае венериной мухоловки и некоторых других хищных растений с захлопывающимися ловушками тоже понятно, а что насчёт остальных? Есть большое количество исследований, которые говорят, что растения реагируют электросигналами буквально на всё: на холод, тепло, свет, на прикосновения и травмы, на изменения в солёности почвы и недостаток влаги. Электрические изменения на мембране у растительных клеток происходят преимущественно за

счёт перекачки ионов кальция (хотя в этом участвуют также и другие ионы). Если мы, например, резко охладим растительную клетку, то увидим, как в неё хлынет поток кальция, и мембранный потенциал мгновенно изменится. Потоками ионов управляют разные каналы, причём у разных растений они работают в разных конфигурациях. Но до сих пор не вполне ясно, как выглядит тот растительный рецептор, который чувствует холод, и как именно он его чувствует. Одно из объяснений состоит в том, что ионные каналы ощущают, как меняется вязкость мембраны, в которой они сидят.

Вообще, в случае растений исследователи для каждого раздражителя (будь то температура, физическое воздействие и прочее) предлагают довольно сложные схемы молекулярных взаимодействий, которые обуславливают изменения в электрическом потенциале на мембране. В этих взаимодействиях свою роль играют не только большие молекулы вроде белков, но и простые продукты метаболизма, и глубоко физические силы, которые проявляются, когда растительная клетка теряет или, наоборот, всасывает в себя жидкость, меняясь в объёме.

Но вот клетка перетасовала ионы на мембране — можно сказать, что она сформировала сигнал и готова отправить его соседям. Тут мы, наконец, подходим к нашему вопросу: есть ли у растений какие-нибудь нервы, или, говоря иначе, есть ли у них специальные провода, которые куда-нибудь доставят электрический сигнал?

Такие провода у них есть — это сосуды транспортных тканей, ксилемы и флоэмы. По сосудам ксилемы идёт вода и минеральные вещества, взятые растением из почвы, по сосудам флоэмы — органические вещества, появившиеся в результате фотосинтеза.

Распространение электрохимического сигнала по нейрону. В состоянии покоя клеточная мембрана снаружи заряжена положительно, а внутри отрицательно. Чтобы передать сигнал, в мембране открываются ионные каналы, ионы перемещаются внутрь нейрона и наружу. В результате снаружи мембрана ненадолго становится отрицательной, а внутри положительной. Электрические изменения чувствуют следующие ионные каналы, лежащие далее по ходу сигнала, и на этих участках мембраны происходит то же самое. А вот те участки мембраны, которые своё отработали, возвращаются к прежнему состоянию и какое-то время отдыхают, ни на что не реагируя. Похожим образом распространяются электрические сигналы по сосудам растений.

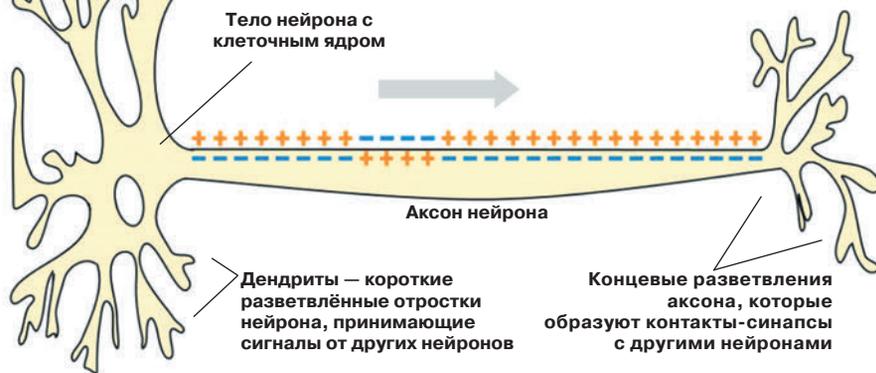
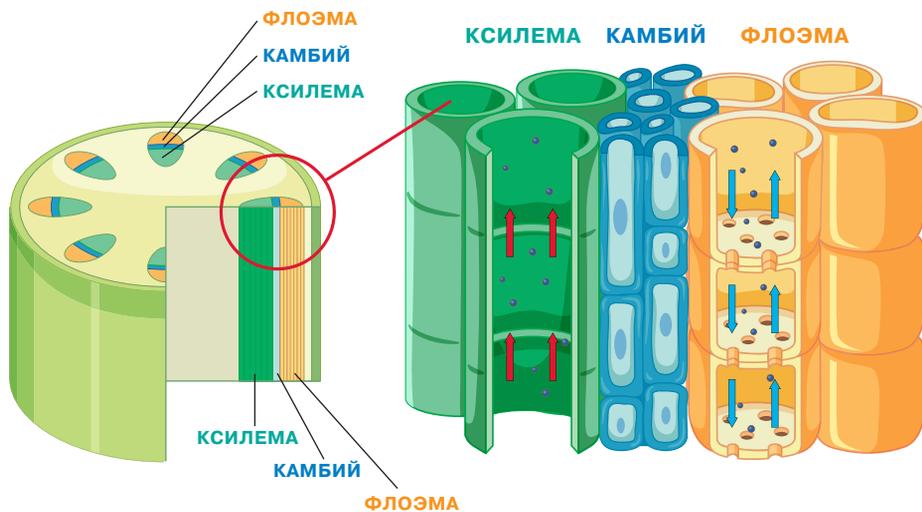


Рисунок (с изменениями): Laurentaylor/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0



Расположение ксилемы и флоэмы на поперечном и продольном срезе в стебле растения. Сосуды ксилемы и флоэмы собраны в несколько пучков. В каждом пучке сосуды ксилемы расположены ближе к центру стебля, сосуды флоэмы — ближе к поверхности; между ними есть слой камбия — специальной ткани, которая формирует новые сосуды и помогает стеблю расти в ширину.

Рисунок (с изменениями): Freerik.cfm

МУХОЛОВКИНА АРИФМЕТИКА

Каждая ловушка венериной мухоловки — это один лист, согнутый по главной жилке и снабжённый по краям жёсткими длинными «усиками». На внутренней стороне ловушки-листа есть чувствительные, даже сверхчувствительные волоски — чтобы они послали сигнал, достаточно отклонить их на 2,9 градуса.

Но вдруг в ловушку занесло что-то неживое? Мухоловка не сразу закрывает её: после первого сигнала от чувствительных волосков должен прийти второй. Мухоловка в прямом смысле считает до двух. Причём между сигналами должно пройти не более 30 секунд. Если между ними прошло больше 30 секунд, то это, скорее всего, случайные помехи, а не настоящая добыча. Но чтобы считать касания, их

нужно как-то запоминать. То есть мухоловка должна полминуты держать «в уме» первое касание, пока случится — или не случится — второе касание.

Не так давно удалось выяснить, как работает память мухоловки: всё дело оказалось в тех же ионах кальция. После первого касания уровень кальция в клетке резко возростал, но уже через несколько секунд начинал падать. Если не позже, чем через полминуты, случилось второе касание, новый поток ионов повышал их концентрацию выше определённого уровня и ловушка захлопывалась. Если же второе касание случилось более чем через 30 секунд после первого, то кальция в клетках ловушки оставалось уже слишком мало и вторая волна кальция не могла довести концентрацию ионов до нужного значения.

У растений нет сократительных клеток, из которых состоят наши мышцы. Как же тогда мухоловка захлопывает ловушку?

Сигнал от волосков распространяется по листу и добирается до главной жилки — она играет роль стержня, на котором сидят обе створки ловушки. Получив электрический импульс, клетки вокруг жилки и клетки на обеих лопастях мгновенно сбрасывают большое количество воды или, наоборот, всасывают. Те, которые сбросили воду, уменьшаются в объёме, а те, которые всосали, увеличиваются, и в результате лопасти листа-ловушки двигаются. Вместо мышц у мухоловки работает гидравлика.

Ещё одна особенность мухоловки состоит в том, что её можно погрузить в наркоз: диэтиловый эфир обездвиживает её ловушки. При этом волоски в ловушке чувствуют прикосно-

● ПОДРОБНОСТИ ДЛЯ ЛЮБОЗНАТЕЛЬНЫХ

Достаточно давно удалось выяснить, что сосудистая система служит ещё проводником электрических сигналов. Измеряя электрические параметры в разных участках сосудистых пучков, можно увидеть, как последовательно меняются в них электрические потенциалы, а с помощью мутаций можно показать, что для распространения сигнала нужны

белки, манипулирующие потоками ионов.

Уподоблять флоэму и ксилему нервам животных можно с большой натяжкой. Вот если бы наши нервы одновременно работали кровеносными сосудами, тогда другое дело. Кроме того, до сих пор не очень понятно, как электрический сигнал «бежит» по флоэме и ксилеме. Например, у рас-

вения, но не могут никому о них рассказать — импульсы от них не распространяются.

Оказалось, что диэтиловый эфир подавляет работу рецептора глута-

миновой кислоты; иными словами, электрический сигнал у мухоловки «бежит» с помощью глутаминовой кислоты, или глутамата. Глутаминовая кислота — один из нейро-

медиаторов, используемых нейронами; видимо, какую-то сходную функцию она выполняет и у некоторых растений (кроме мухоловки, наркозу подвержена мимоза стыдливая).

ГРИБНОЙ ЯЗЫК

Умение генерировать электрические импульсы без специальной нервной системы есть не только у растений. Например, ещё во второй половине XX века у грибов начали измерять сигналы, похожие на нейронные. Нервами в данном случае служит само тело гриба — мицелий, состоящий из множества ветвящихся нитей, называемых гифами.

Одни исследователи утверждают, что электрическими сигналами грибы общаются друг с другом, причём особенно активно, когда обнаруживают много еды или когда у них случаются повреждения. Другие исследователи пи-

шут об электрических токах, которыми обмениваются растения и грибы при формировании симбиотической микоризы — когда гифы гриба обволакивают корни растения и проникают внутрь них, помогая растениям добывать минеральные вещества из почвы. Правда, не вполне ясно, какую роль электрические токи играют в микоризе. А кто-то даже утверждает, что у грибов есть свой электроимпульсный язык.

Эксперименты с розовой вёшенкой, обыкновенным щелелистником и некоторыми другими грибами показали, что они генерируют импульсы пачками, или кластерами. Эти

кластеры импульсов могут отличаться по частоте, амплитуде и другим параметрам. Если уподобить их словам, то можно увидеть целые грибные предложения; самый сложный «язык» демонстрирует щелелистник — повсеместно распространённый гриб, живущий на гниющей древесине. Правда, некоторые специалисты воспринимают идею грибного языка со скепсисом: известно, что электрическая пульсация сопровождает у грибов транспорт питательных веществ, так что энтузиасты грибного языка, скорее всего, принимают за слова и предложения побочные эффекты обмена веществ.

тений есть ионные каналы, которые способны чувствовать электрические изменения рядом с собой — в ответ на эти изменения они открывают поток ионов на своём участке (подобные ионные каналы, которые зависят от напряжения, обеспечивают «бег» импульса по нейрону). Но пока мы знаем лишь, что такие белки у растений в принципе есть. Насчёт того, как они

участвуют в проведении импульса и участвуют ли вообще, пока надёжных данных нет. А из того, что они могут это делать, ещё не значит, что они действительно это делают.

Если перейти от молекул к клеткам, то сосуды флоэмы и ксилемы устроены достаточно сложно, из клеток разных типов. Предположительно, импульсы проводят только клетки определённого

типа. Возникает вопрос: как они передают друг другу сигнал?

У животных нейроны соединены сложными контактами-синапсами, специально устроенными так, чтобы перебрасывать сигнал от клетки к клетке. У растений ничего такого нет. Возможно, импульс просто электрически перескакивает с клетки на клетку (у животных такое тоже происходит на некоторых нейронах), но тут опять же нужны дополнительные исследования. Пока мы видим только, что растительные «псевдонервы» — флоэма и ксилема — умеют проводить электрические сигналы.

Что происходит там, куда сигнал «добежал»? Там меняется активность генов, повышается или понижается уровень тех или иных гормонов, меняются физиологические настройки. Например, если отщипнуть кончик листа у кукурузы, то весь лист — а он довольно длинный — начнёт меньше поглощать углекислого газа и меньше испарять влаги. Повреждение листа указывает на какого-то вредителя, который, скорее всего, и дальше будет поедать этот лист. Поэтому растению незачем накапливать в нём питательные вещества, а значит, не стоит поглощать много углекислого газа и вообще можно ослабить в листе обмен веществ. Такой подход оправдывает себя: например, если в арабидопсисе* появятся мутации, которые мешают флоэме и ксилеме проводить электрические сигналы, то насекомые, питающиеся на таком растении, будут быстрее набирать вес, чем на арабидопсисе

* *Arabidopsis thaliana*, или резуховидка Таля — небольшое травянистое растение семейства Капустные. Это один из главных экспериментальных объектов в исследованиях, посвящённых физиологии, молекулярной и клеточной биологии растений.

с работающей «электропроводкой». Очевидно, с помощью электрических сигналов растения могут не просто почувствовать на себе нахлебников, но и ограничить их в калориях.

Насколько сильно растение ответит на электрический сигнал, зависит от параметров самого сигнала; кроме того, известно, что разные раздражители вызывают разные типы сигналов, то есть от сильного холода сигнал получается один, а от механического повреждения другой.

Физиологический эффект от полученного импульса обусловлен изменениями в ионных потоках, которые нужны для распространения самого импульса. Там, куда он добрался, меняется концентрация ионов кальция, ионов водорода и других ионов, к которым чувствительны различные регуляторные белки, влияющие на биохимические реакции, на активность генов и гормонов.

Умение растений генерировать электрические импульсы настолько впечатлило некоторых исследователей, что они предлагают признать у растений наличие собственной нервной системы — уж больно это похоже на то, что мы видим у животных. Речь не о том, чтобы приравнять одних к другим, а пересмотреть определение нервной системы — так, чтобы оно описывало не только нейроны и мозг у животных, но и растительные электрические импульсы.

Но нельзя не признать — сколько мы видим здесь общего, столько же видим и отличий. В сравнении с животными у растений нет ничего специального для проведения электрического сигнала: ни клеток, ни межклеточных соединений, ни тканей с органами. Может быть, научный консенсус на этот счёт в будущем изменится, но пока растительные «нервы» лучше держать в кавычках.