

УДК 159.9

ББК 88

Ф 94

*Все права защищены. Любое использование материалов
данной книги полностью или частично
без разрешения правообладателя запрещается*

Редакционная коллегия:

*А. А. Алдашева, И. О. Александров, Ю. И. Александров, Б. Н. Безденежных,
Н. В. Борисова, Ю. В. Быховец, А. Е. Воробьева, Т. В. Галкина,
Т. В. Дробышева, Е. Н. Дымова, Т. П. Емельянова, А. Л. Журавлёв (отв. ред.),
А. Н. Занковский, Н. Н. Казымова, Ю. В. Ковалева, В. А. Кольцова (отв. ред.),
А. Н. Костин, А. И. Лактионова, А. В. Махнач, Л. Ш. Мустафина,
Т. А. Нестик, А. А. Обознов, Н. Д. Павлова, М. А. Падун, Ю. В. Постылякова,
Е. С. Самойленко, Е. А. Сергиенко, Н. В. Тарабрина,
Б. Н. Тугайбаева (отв. секретарь), Д. В. Ушаков, М. А. Холодная*

Ф 94 **Фундаментальные и прикладные исследования современной психологии: результаты и перспективы развития** / Отв. ред. А. Л. Журавлёв, В. А. Кольцова. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2017. – 2704 с.

ISBN 978-5-9270-0362-4

УДК 159.9

ББК 88

Сборник научных работ освещает широкий круг фундаментальных и прикладных проблем современной психологической науки, отражает ее состояние и представляет систему основных отраслей, научных направлений и проблем, а также важнейшие тенденции ее развития: усиление комплексности, междисциплинарности и системности исследований, их социальной ориентированности, гуманизации в трактовке личности и социальных общностей, появление новых, отвечающих запросам времени научных разработок.

*Издание подготовлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 17-06-14058г
Всероссийская юбилейная научная конференция «Фундаментальные и прикладные исследования современной психологии: результаты и перспективы развития», посвященная 45-летию ИП РАН и 90-летию со дня рождения его создателя и первого директора Б. Ф. Ломова*

© ФГБУН Институт психологии РАН, 2017

ISBN 978-5-9270-0362-4

Электрические осцилляции у растений¹

Т. Н. Греченко*, А. Н. Харитонов**, А. В. Жегалло** (Москва)

* доктор психологических наук,
ведущий научный сотрудник Института психологии РАН;
e-mail: grecht@mail.ru

** кандидат психологических наук,
старший научный сотрудник Института психологии РАН;
e-mail: ankhome47@list.ru

*** кандидат психологических наук,
научный сотрудник Института психологии РАН;
e-mail: zhegs@mail.ru

Ритмические осцилляции регистрируются у организмов разной сложности как у прокариот, так и у более высоко организованных многоклеточных существ. Предполагается, что весь имеющийся набор ритмов подготовлен эволюционно. Для проверки идеи об эволюционной консервативности основных ритмов осцилляторной активности были выполнены электрофизиологические эксперименты на срезах плодов растений – яблоках *Malus domestica* 'Jonagold' и моркови *Daucus carota subsp. Sativus*. Анализ спектрального состава ритмической активности показал локализацию пиков в области 7–12, 15–16, 28–32 Гц, а кросскорреляционный анализ активности, отводимой одновременно двумя электродами, выявил динамичные связи между разными зонами плода. Полученные результаты подтверждают правомерность предположения о сохранении в эволюции частотных параметров электрических осцилляций, существенных для взаимодействия организма со средой.

Ключевые слова: осцилляции, растения, эволюция, ритмическая активность, коммуникация.

1 Работа выполнена в соответствии с Государственным заданием ФАНО РФ № 0159-2017-0009 и 0159-2017-0004.

Введение

Механизмы и функциональное значение ритмов до сих пор остаются предметом дискуссий. Многообразное и противоречивое понимание функциональной роли электрической ритмики демонстрирует отсутствие прямой связи между нейрофизиологическим проявлением мозговой активности и ее значением для реализации определенного поведения. Поскольку ритмические осцилляции регистрируются у организмов разной сложности и у существ, не имеющих нервной системы, можно предполагать, что весь имеющийся набор ритмов подготовлен эволюционно, а актуальный, реализуемый в данный момент частотный паттерн связан с текущим состоянием. Ранее полученные результаты доказали справедливость этого предположения – осцилляторная электрическая активность сходных частотных диапазонов присутствует, как у прокариот (цианобактерий, сенной палочке и др.), так и у более высоко организованных многоклеточных существ (пиявке, моллюске) (Греченко и др., 2015). Для повышения уровня значимости идеи об эволюционной консервативности основных ритмов осцилляторной активности, нужно проверить ее распространение и на представителей мира флоры – растения.

Методика исследования

Электрофизиологические опыты выполнены на срезах моркови *Daucus carota subsp. sativus* и яблока *Malus domestica 'Jonagold'*. Толщина срезов 2–2,5 мм. Для отведения электрической активности применяли стеклянные электроды, заполненные 1 М раствором KCl. В части опытов использовалась регистрация одновременной двумя электродами, помещенными в разные области среза плода. Фрагменты записи электрической активности оцифровывались и подвергались спектральному анализу в среде статистической обработки R 3.0 (R Development Core Team, 2011). Спектральный анализ выполнялся для исходной записи путем построения периодограммы с использованием быстрого преобразования Фурье. 95% доверительные интервалы мощности спектра вычислялись на основе аппроксимации χ^2 распределением. Наличие электрической связи между парой локусов биопленки при их одновременной регистрации выявлялась при помощи кросскорреляционного анализа. Длительность оцифрованных участков была равна 3 с.

Результаты исследования

Регистрация макроэлектродами от клеток плодов моркови *Daucus carota subsp. sativus* и яблока *Malus domestica Jonagold* позволила обнаружить ритмическую электрическую осцилляторную активность, организованную в веретена (рисунок 1А). Следовательно, эти клетки имеют генераторы осцилляций, синхронизация которых порождает различные ритмы. Анализ спектрального состава показал локализацию пиков в области 7–12, 15–16, 28–32 Гц (рисунок 1Б). В части опытов применялась регистрация двумя электродами, расположенными в разных зонах исследуемого объекта (рисунки 1Аа, б). В этом случае анализировалось взаимодействие между клетками плода, разделенными некоторым расстоянием – в проведенных опытах это 0,3–1,5 см. Кросс-коррелограммы показали, что между клетками плода устанавливаются функциональные отношения, которые претерпевают определенные изменения во времени (рисунок 1Ва, б). Длительность регистрации осцилляторной активности, организованной в специфические паттерны – веретена, группы осцилляций или одиночные волны – может быть разной как на срезах одного и того же плода, так и у разных плодов. Через 2–3 часа после изготовления препарата электрическая активность срезов плодов снижается – амплитуда колебаний падает, а вспышки веретена или групп происходят значительно реже. Есть и отличия в ритмической активности, зарегистрированной от целого плода, без изготовления среза. Электрическая регистрация суммарной активности показала, что свежие срезы яблока, моркови, а также проросшие горошины и корни картошки имеют ярко выраженные осцилляторные колебания.

Обсуждение полученных результатов

Эксперименты, выполненные на живых существах разного таксономического положения и эволюционного возраста, показывают наличие осцилляторной ритмической электрической активности не только у разных представителей животного мира, но и у растений. Электрические сигналы у растений были впервые описаны еще в XIX в. Работы Дж. Бурдон-Сандерсена и Ч. Дарвина, а потенциалы действия зарегистрированы уже в XX в. у целого ряда различных растений. Нейроны и клетки растений имеют общую способность генерировать спонтанные потенциалы действия и с их помощью передавать электрические сигналы по тканям мультиклеточных организмов (Trewavas, 2016). То, что растения имеют не только элек-

трическую возбудимость, но и способны генерировать потенциалы действия и ритмические осцилляции, показано во многих работах (Воденеев и др., 2007; Токо et al., 1990), в частности, в исследовании Хойта (1947) рассмотрены осцилляции, зарегистрированные от проростков картофеля. Получены факты о роли электрических сигналов во многих жизнеобеспечивающих процессах – дыхании, потреблении воды, сбрасывании листьев и др., однако большая часть исследований проведена в условиях применения воздействий, повреждающих наземную часть растения.

В опытах, выполненных на плодах растений – в данном случае яблоках и моркови – осцилляторные электрические ритмы представлены в традиционных для нейрофизиологии частотных диапазонах. Это дает основания считать, что выдвинутое предположение о сохранении в эволюции параметров электрических сигналов, существенных для взаимодействия организма со средой (внутренней и внешней), справедливо. Тем не менее, необходимо отметить, что частотные диапазоны ритмической активности в проведенных опытах выше, чем в работах таких авторов, как Токо и др. (1990) и Хойт (1947). Можно предположить, что причина заключается в различии исследуемых объектов – работы этих авторов выполнены на ростках картофеля, на стеблях и листьях растений. В нашем случае регистрации проведены на плодах. Весьма существенным может оказаться и вид механизма синхронизирующего осцилляторы отдельных клеток. В плодах – яблоке и моркови – клетки, имеющие генераторы ритмов, образуют весьма плотные объединения, в которых электрический сигнал может быстро вовлекать значительное число единиц, тем самым объединяя во времени многие электрически выраженные события. При этом возможно объединение при помощи межклеточных контактов и непосредственное действие электрического поля на все ткани, окружающие клетку-генератор. В опытах показана роль различных ионов в распространении сигналов – например, роль входа кальция и выхода хлора и калия в распространении электрического сигнала внутри жилок на листьях. Изменение концентрации этих ионов в клетке может оказаться важным для внутриклеточных и для дистантных коммуникаций. У растений не обнаружены «настоящие» синапсы, однако имеются их функциональные аналоги. Кроме того, в исследованиях по молекулярной биологии растений идентифицированы нейротрансммиттеры, типичные для нервных систем животных, а также ацетилхолин эстераза, глутаматные рецепторы, ГАБА рецепторы, эндоканнабиноидные сигнальные компоненты, показана сигнальная функция АТФ, NO и ROS (Ripoll et al., 2009). Один из хорошо изученных и ши-

роко распространенных возбуждающих нейромедиаторов – это глутамат, который действует через глутаматные рецепторы синапсов. Эти глутаматные рецепторы присутствуют и у прокариотических бактерий, и у растений (Davenport, 2002). Важно, что рецепторы растений имеют все свойства, типичные для них у нейронов, а глутамат вызывает у растений генерацию потенциалов действия. Это приводит к предположению о том, что и в этом случае глутамат выполняет функцию нейротрансмиттера при коммуникации типа «клетка–клетка». На растениях есть области, отвечающие на действие глутамата быстрой деполяризацией плазматической мембраны, и этот ответ блокируется специфическим антагонистом ионотрофного глутаматного рецептора 2-amino-5-phosphonopentanoate (Davenport, 2002).

Несмотря на отсутствие у растений нервной системы, появляется все больше свидетельств того, что они обмениваются информацией. Хорошо известно, что повреждение листьев травоядными животными может привести к защитным реакциям у рядом расположенных растений (Moreira et al., 2016; Liechti, Farmer, 2006). В опытах на плодах яблока с одновременной регистрацией активности из двух разных зон мы получили результаты, показывающие взаимодействие между отдаленно стоящими клетками. Эти «диалоги» показывали изменение приоритета регистрируемых областей плода и были весьма динамичны.

Растения выполняют нейроподобные операции не только для того, чтобы приспособиться к быстро изменяющимся физическим условиям, но и для того, чтобы обмениваться информацией с другими растениями того же вида (Karban, 2008; Trewavas, 2017). Результаты многих исследований показывают, что растения могут запоминать определенные воздействия, угрожающие их жизни. Роль запоминания заключается в усилении интегративного ответа на многие изменяющиеся стимулы, постоянно поступающие из окружающей среды (Ripoll et al., 2009; Volkov et al., 2014).

Результаты опытов показали, что вольт-управляемые К-каналы возбудимой ткани растений имеют свойства, которые помогают понять механизмы обучения, памяти и биологических часов (Baluška, Mancuso, 2009).

Заключение

Ритмические осцилляции регистрируются у организмов разной сложности, начиная с прокариот. Электрофизиологические опыты выполненные на срезах моркови *Daucus carota subsp. sativus* и ябло-

ка *Malus domestica* 'Jonagold' показали присутствие ритмической осцилляционной активности, а анализ спектрального состава показал локализацию пиков в области 7–12, 15–16, 28–32 Гц. Следовательно, весь набор основных ритмов – альфа, бета, дельта – подготовлен эволюционно и присутствует у всех живых существ, включая растения.

Литература

- Воденев В. А., Опритов В. А., Мысягин С. А., Пятыгин С. С. Дистанционные электрические сигналы у растений: Учебно-методическое пособие. Н. Новгород, 2007.
- Греченко Т. Н., Харитонов А. Н., Жегалло А. В., Александров Ю. И. Психфизиологический анализ осцилляторных процессов в поведении биосоциальных систем // Психологический журнал. 2015. Т. 36. № 6. С. 75–87.
- Baluška F. Recent surprising similarities between plant cells and neurons // Plant Signaling and Behavior. 2010. V. 5. № 2. P. 87–89.
- Davenport R. Glutamate receptors in plants // Annals of Botany. 2002. V. 90. P. 549–557.
- Hoyt R. C. Potential oscillations in the onion root resulting from current flow // J. Cell Comp Physiol. 1947. V. 29. № 2. P. 131–147.
- Moreira X., Nell C. S., Katsanis A., Rasmann S., Mooney K. A. Herbivore specificity and the chemical basis of plant–plant communication in *Vaccinium salicifolia* (Asteraceae) // New Phytol. 2016. V. 6. № 9 [Epub ahead of print] (дата обращения: 30 апреля 2017 г.).
- Ripoll C., LeSceller L., Verdus M.-C., Norris V., Tafforeau M., Thellier M. Memorization of abiotic stimuli in plants: a complex role for calcium // Plant–Environment Interactions From Sensory Plant Biology to Active Plant Behavior Editors / Ed. F. Baluška. 2009. P. 267–283.
- Shabala S., Shabala L., Gradmann D., Chen Z., Newman I., Mancuso S. Oscillations in plant membrane transport: model predictions, experimental validation, and physiological implications // Journal of Experimental Botany. 2006. V. 57. № 1. P. 171–184.
- Toko K., Souda M., Matsuno T., Yamafuji K. Oscillations of electrical potential along a root of a higher plant // Biophysical journal. 1990. V. 57. P. 269–279.
- Trewavas A. The foundations of plant intelligence // Interface Focus. 2017. V. 6. № 7 (3). 20160098 Epub 2017 Apr. 21. Review (дата обращения: 29.04.2017).
- Volkov A. G., Tucket C., Reedus J., Volkova M. I., Markin V. S., Chua L. Memristors in plants // Plant Signaling and Behavior. 2014. V. 9. e28152. Epub 2014 Feb. 20 (дата обращения: 30 апреля 2017 г.).

Electric oscillations at plants

*T. N. Grechenko**, *A. N. Kharitonov***, *A. N. Zhegallo**** (Moscow)

* Doctor of psychological Sciences, leading researcher
of the Institute of Psychology of RAS

** Candidate of psychological Sciences, senior research officer
of the Institute of Psychology of RAS

*** Candidate of psychological Sciences, research officer
of the Institute of Psychology of RAS

Rhythmic oscillations are registered at organisms of different complexity both at procariotes and at more highly organized multicellular entities. It is supposed that all available set of rhythms is prepared evolutionarily. For check of the idea about evolutionary conservatism of the main rhythms of oscillatory activity electrophysiological experiments on cuts of fruits of plants – *Malus domestica* ‘Jonagold’ apples and *Daucus carota Sativus* were executed. The analysis of a spectral distribution of rhythmic activity showed localization of peaks in the area 7–12, 15–16, 28–32 Hz, and the crosscorrelational analysis of the activity which is taken away at the same time by two electrodes revealed dynamic communications between different zones of a fruit. The received results confirm legitimacy of the assumption of preservation in evolution of the parameters of the electric oscillations essential to interaction of an organism with environment.

Keywords: oscillations, plants, evolution, rhythmic activity, communication.