

Московский институт психоанализа

# **ЭВОЛЮЦИОННАЯ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ПСИХОЛОГИЯ В РОССИИ**

**теория и практика  
исследований**

Под редакцией

*И. А. Хватова и А. Н. Харитонова*

Москва  
Когито-Центр  
2017

УДК 159.9  
ББК 88  
Э 15

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

Редакционная коллегия:

*Ю. И. Александров, К. И. Ананьева, В. А. Барабанщиков, В. В. Гаврилов,  
И. И. Знаменская, О. А. Королькова, В. И. Панов, А. А. Созинов (отв. секретарь),  
А. Н. Харитонов (отв. ред.), И. А. Хватов (отв. ред.)*

**Э 15 Эволюционная и сравнительная психология в России: Теория и практика исследований / Под ред. И. А. Хватова, А. Н. Харитонova. — М.: Когито-Центр, 2017. — 334 с.**

ISBN 978-5-89353-528-0

УДК 159.9  
ББК 88

Коллективный труд, подготовленный ведущими отечественными специалистами, представляет собой современный срез эволюционной и сравнительной психологии в России. Рассматриваются вопросы истории и теории эволюционных и сравнительно-психологических исследований, а также использования психологических методов в исследованиях поведения. Проблема межвидового взаимодействия представлена на материале взаимодействия человека и других видов животных. В книге отражен широкий спектр эмпирических исследований и материалы, представляющие попытку экспериментально-психологического решения ряда конкретных проблем фило- и онтогенетического плана. Монография ориентирована на психологов-эволюционистов, зоопсихологов, этологов, а также на широкий круг специалистов разного профиля, интересующихся эволюционной и сравнительно-психологической проблематикой.

*Подготовка и публикация коллективного труда осуществлена  
при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований  
(РФФИ), проект № 17-06-14161z*

© НОЧУ ВО Московский институт психоанализа, 2017

ISBN 978-5-89353-528-0

# Роль синхронизации электрических осцилляций в биокommunikации\*

*Т. Н. Греченко, Л. К. Хлудова*

**Б**иокommunikация — вся совокупность процессов распространения и обмена информацией в мире живых существ. Организмы, у которых хотя бы в зачаточном виде имеется социальная интеграция, уже обладают простейшей коммуникацией, она является основным компонентом социального поведения (Emmeche, Ruhl, 2011; Ben-Jacob, 2003). Коммуникация между живыми существами основана на нескольких основных эволюционно-консервативных каналах передачи информации. Один из них является электрическим. Сигналы в этом канале создаются электрической активностью элементов, включенных в процесс формирования информационных посылок. Предполагается, что существенным компонентом электрического процесса является не вообще его наличие, а его дискретность, его дробление на паттерны, отражающие временную структуру задействованных осцилляторных механизмов (Бодунов, 1998; Каплан и др., 2006, Греченко и др., 2015). Биологические осцилляторы обнаружены у всех живых организмов. Они играют важную роль в поддержании гомеостаза и кодировании информации. Независимые осцилляторы, принадлежащие разным клеткам, часто синхронизируются, причем не всегда причиной является внешнее воздействие (Kim et al., 2010).

Результаты опытов, выполненных на организмах, принадлежащих разным уровням эволюции, от прокариот-цианобактерий до человека, показали, что осцилляторная активность всех существ имеет частотные спектры, сходные с обнаруженными в ЭЭГ человека и высших позвоночных животных (3–5 Гц, 10–12 Гц, 40–45 Гц),

---

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-28-00229), Институт психологии РАН.

у всех идентифицированы весьма сходные по временным характеристикам паттерны осцилляторной активности (Греченко и др., 2015). Опыты, выполненные с одновременной регистрацией электрической активности из двух локусов биопленки цианобактерий и дрожжевых клеток, показали, что синхронизация осцилляций имеет не только локальный характер, т. е. развивается в пределах одного локуса, но и вовлекает в процесс фасилитации другие, даже далеко расположенные клетки. Появление аналогичных результатов, полученных на плодах растений (моркови, яблоке, огурце) и плодовых телах миксомицетов, приводит к предположению о наличии сходных механизмов синхронизации осцилляторной активности по крайней мере у исследованных в наших опытах существ (прокариотических и эукариотических микроорганизмов, многоклеточных, сложно организованных существ – моллюсков и пиявок) и плодов растений. Применение дополнительных способов анализа позволило получить новые данные, показывающие не только сходство частотных диапазонов электрической осцилляторной активности, но и наличие одинаковых паттернов, характеризующих временную организацию осцилляций у плодов растений и плодового тела миксомицетов, и сходство механизмов синхронизации.

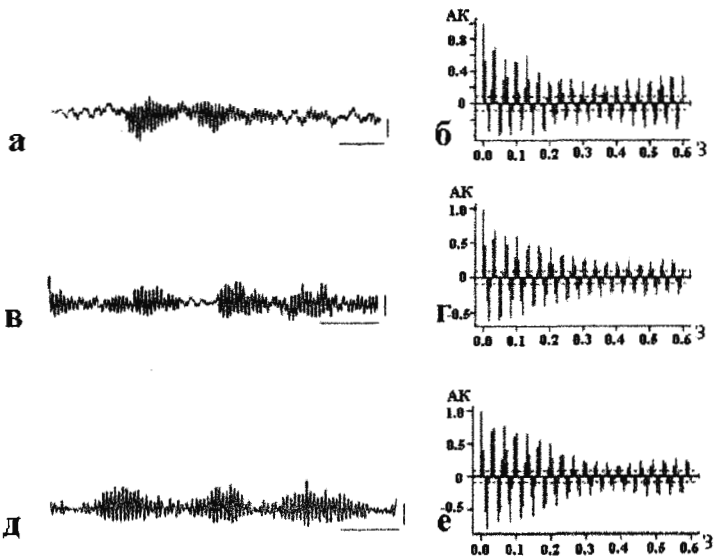
## Методика

Электрофизиологические опыты выполнены на плодовом теле миксомицетов *Lycogala epidendrum* и срезах огурца *Cucumis sativus* и яблока *Malus domestica* 'Jonagold'. Толщина срезов 2–2,5 мм. В части опытов использовалась регистрация одновременно двумя электродами, помещенными в разные области среза одного плода или в срезы разноименных плодов (пара огурец–яблоко). Взятые из природной среды миксомицеты исследовались в лабораторных условиях при комнатной температуре воздуха. Регистрация электрической активности производилась стеклянными электродами, заполненными 1 М KCl. 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  $\chi^2$  распределением. Наличие электрической связи между парой локусов плодов при их одновременной регистрации выявлялась при помощи кросскорреляционного анализа. Для выявления

структурных особенностей осцилляторной активности проводился автокорреляционный анализ. Длительность оцифрованных участков 3 с.

### Результаты

Из регистраций от срезов яблока *Malus domestica* 'Jonagold', огурца *Cucumis sativus* и плодового тела миксомицетов *Lycogala epidendrum* выбирались участки, различающиеся состоянием активности. В результате были получены данные об их частотном составе и временной структуре. Оказалось, что у одного и того же объекта регистрируются образцы активности, имеющие характерную временную структуру (паттерны), эти паттерны устойчивы и повторяются у разных экземпляров одного и того же биологического вида. У организмов разного вида (в данном случае у плодового тела миксомицетов и плодов овощей) есть одинаковые по структуре паттерны (рисунок 1).



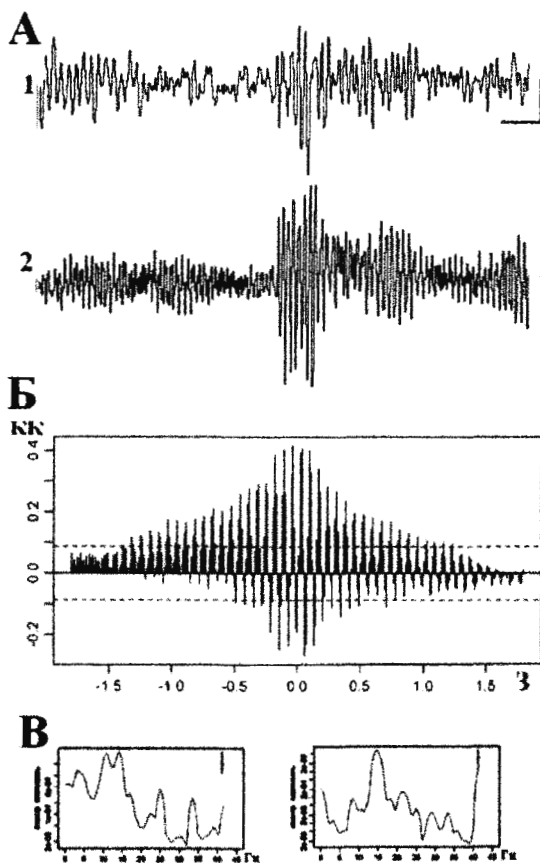
**Рис. 1.** Электрическая активность, зарегистрированная у организмов разного эволюционного уровня: миксомицетов *Lycogala epidendrum* (а), яблока *Malus domestica* 'Jonagold' (в) и огурца *Cucumis sativus* (д) и их автокоррелограммы, соответственно, б, г, е. Обозначения: ось абсцисс — частоты в Гц, ось ординат — спектральная плотность в условных единицах, горизонтальная черта — полоса пропускания, вертикальная черта — 95% доверительный интервал

Миксомицеты – организмы, решающие при помощи кооперации важнейшую для сообщества проблему выживания. В опытах на миксомицетах регистрация электрической активности проводилась двумя электродами с поверхностного слоя плазмодия. Кросс-коррелограммы выявили высокую степень синхронизации осцилляторных процессов, одновременно зарегистрированных от двух поверхностных локусов, показывая жесткую зависимость электрически выраженных событий. Эта зависимость проявляется не только для осцилляторов, зарегистрированных при размещении электродов на поверхности плодового тела, но и при продвижении электродов в более глубоко расположенные структуры. По-видимому, в данном случае успешное решение социально значимой задачи базируется на синхронизации электрических процессов членов сообщества.

В отличие от миксомицетов, исследованные информационные послышки от клеток срезов огурца и яблока вряд ли содержат социально значимые сведения. В опытах на плодах яблока *Malus domestica* 'Jonagold' с одновременной регистрацией активности из двух разных зон получены результаты, показывающие взаимодействие между удаленно стоящими ансамблями клеток. Кросс-коррелограммы показали наличие разных уровней взаимодействия – от полной зависимости одного локуса от другого до независимой активности каждого из них. Интересным оказалось взаимодействие между разноименными объектами, активность которых регистрировалась одновременно – например, огурец и яблоко (рисунок 2).

## **Обсуждение**

Опыты на живых организмах разного эволюционного уровня показали, что у одного и того же объекта регистрируются паттерны разной структуры; эти паттерны устойчивы и повторяются у разных экземпляров одного и того же биологического вида; один и тот же паттерн воспроизводится много раз у одного и того же объекта; у эволюционно разных существ есть одинаковые по структуре паттерны; паттерн определяет уровень активности и тип поведения организма. Результаты опытов вызывают несколько основных вопросов: действительно ли одновременно зарегистрированные активности в ряде случаев являются «диалогами», а не случайным совпадением фасилитированных осцилляций у исследуемых объектов? Что является инициатором синхронизации осцилляторов у отдельно взятого объекта? Каким может быть механизм вовлечения другого объекта?



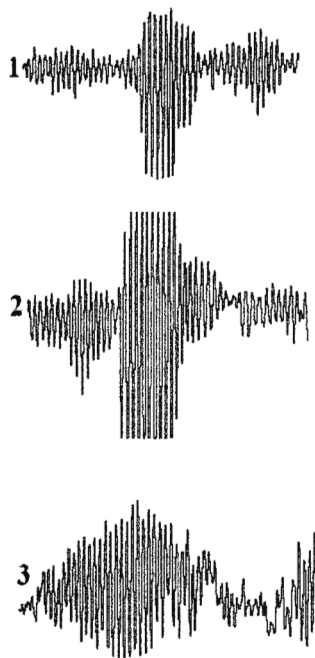
**Рис. 2.** Синхронизация электрической активности между двумя зарегистрированными объектами — огурца *Cucumis sativus* (1) и яблока *Malus domestica 'Jonagold'* (2). А — электрическая активность, одновременно зарегистрированная от среза огурца *Cucumis sativus* (1) и яблока *Malus domestica 'Jonagold'* (2), Калибровка: 300 мс, 50 мкВ; Б — кросскоррелограмма, характеризующая взаимодействие между активностью 1 и 2. Ось абсцисс — запаздывание в секундах, ось ординат — коэффициент кросскорреляции; В — частотные характеристики электрической активности. Обозначения: ось абсцисс — частота в Гц, ординат — спектральная плотность в условных единицах

Для анализа выбирались фрагменты записей, на которых хотя бы один из объектов (или оба) имел выраженную синхронизированную активность. Результаты обработки показали, что на всех фрагментах с одновременной активацией взаимодействие описывается

кросскоррелограммой, представленной на рисунке 2Б. Следовательно, синхронизация осцилляторов между двумя объектами регистрации не была случайной – реально увеличение амплитуды и частоты электрической активности могли бы быть независимыми, что отразилось бы на графике корреляции. Означает ли это существование «диалогов»? Многие клеточные процессы подчинены циркадным ритмам, но есть и осцилляторы с временными константами от миллсекунд до минут. Их функция имеет ярко выраженные биологические последствия: например, они обеспечивают определенную частоту сердцебиений, осцилляции нейронов, работу гликолитических систем мышечных тканей или дрожжевых клеток, движение ионов кальция, изменение концентрации инозитола и кальмодулина и др. При этом многие биологические осцилляторы синхронизируются по причине связывания, вовлечения. В качестве такого механизма предлагается негативная обратная связь (Kim et al., 2010). По этой причине пока нет определенного ответа о существовании «диалогов» между разными объектами или разными локусами одного и того же объекта.

Весьма существенным может оказаться и вид механизма, синхронизирующего осцилляторы отдельных клеток. Электрические осцилляторные явления, регистрируемые в проведенных опытах, созданы активностью ансамбля генераторов, продуцирующих ритмическую активность в нескольких частотных диапазонах. Эти осцилляторы обычно активны в случайном порядке. Однако при определенных условиях эти генераторы объединяются и действуют вместе когерентно. Одним из механизмов объединения является биологический резонанс. Резонанс можно определить как способность системы фасилитировать (или активировать) электрическую передачу с определенной частотной широтой в определенных обстоятельствах (Basar, 1990). В соответствии с этим подходом разные клеточные популяции, активируемые во время информационных процессов параллельно или последовательно, проявляют резонансное поведение в частотном ряду, зависящем от внутренних осцилляторных свойств. В плодах – яблоке, моркови, огурце, плодовом теле миксомицетов клетки, имеющие генераторы ритмов, образуют весьма плотные компактные 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 (рисунок 3). Можно предполагать,





**Рис. 3.** Два способа фасилитации полевых потенциалов: резонансный, зарегистрированный у яблока *Malus domestica* 'Jonagold' (1) и миксомицетов *Lycogala epidendrum* (2), и локальный у яблока *Malus domestica* 'Jonagold' (3)

что механизмом синхронизации осцилляторов в пределах одного локуса является постепенное вовлечение рядом стоящих элементов, а при синхронизации осцилляторов отдаленно расположенных объединений осциллирующих клеток ведущую роль играет биологический резонанс. У растений не обнаружены «настоящие» синапсы, однако имеются их функциональные аналоги (Baluška, 2010; Ripoll et al., 2009). Один из хорошо изученных и широко 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 нейротрансммиттера при коммуникации типа «клетка — клетка». На растениях есть области, отвечающие на действие глутамата быстрой деполя-

ризацией плазматической мембраны, и этот ответ блокируется специфическим антагонистом ионотрофного глутаматного рецептора 2-amino-5-phosphonopentanoate (Davenport, 2002).

В опытах показана роль различных ионов в распространении сигналов – например, роль входа кальция и выхода хлора и калия в распространении электрического сигнала (Костюк и др., 1977). Изменение концентрации этих ионов в клетке может оказаться важным для внутриклеточных и для дистантных коммуникаций. Изменения в структуре, качестве, количестве и локализации протеинов являются механизмами, которые приводят к изменениям нервной системы и поведения. Среди наиболее важных протеинов, которые формируют нейронную активность, это вольт-зависимые ионные каналы и рецепторы для нейромедиаторов. Эти протеины создают нейронную электрическую активность и дают возможность формировать нейронные системы. Если предположить важность калиевых каналов в контроле критичного  $K^+$  градиента вдоль плазматической мембраны живых клеток, не вызывает удивления тот факт, что эти интегральные мембранные белки обнаружены не только у всех эукариотических клеток, но недавно были идентифицированы у прокариот (Harris-Warrick, 2000). Сегодня многие исследования посвящены изучению генов, связанных с калиевыми каналами в геноме зубатерий и архей (Derst et al., 2016). Такие простейшие одноклеточные, как парамеции имеют множество типов ионных каналов, которые могут генерировать потенциалы действия и играть определенную роль в организации и осуществлении таких сложных движений парамеций, как вперед и назад. Множество растений, включая водоросль *Nitella*, генерируют вольт-зависимые потенциалы действия и пользуются ими для быстрых ответов на действия окружающей среды.

## Заключение

Результаты опытов на плодовом теле социальных амеб *Lycogala epidendrum* – миксомицетах и срезах плодов яблока *Malus domestica* 'Jonagold' и огурца *Cucumis sativus* показали существование взаимодействия между отдаленными локусами одного и того же объекта (разными локусами плодового тела миксомицетов) и разными объектами (парой огурец–яблоко, двумя локусами одного и того же объекта). Для миксомицетов синхронизация осцилляторной активности разных локусов плодового тела означала, по-видимому, выработку общей стратегии организма, направленной на выживание. Для других объектов этих опытов синхронизация активностей, скорее всего, была резуль-

татом биологической общности участвующих клеточных ансамблей, элементы которых подчинялись некоторым общим правилам – например, осцилляторы настроены на проявление циркадных ритмов и т. д. Оценивая смысл полученных результатов, можно прийти к выводу о том, что в этих данных проявляется консерватизм эволюционной стратегии живых организмов. Это подтверждается строением белков и генов организмов широчайшего диапазона. Поэтому на уровне клеток и их ансамблей обнаруживается единство в проявлении свойств осцилляторной активности, одинаковых у микроорганизмов, высокоорганизованных животных, приматов и человека.

### Литература

- Бодунов М. В.* «Алфавит» ЭЭГ: типология стационарных сегментов ЭЭГ человека // Индивидуально-психологические различия и биоэлектрическая активность мозга человека. М.: Наука, 1988. С. 56–70.
- Греченко Т. Н., Харитонов А. Н., Жегалло А. В., Александров Ю. И.* Психофизиологический анализ осцилляторных процессов в поведении биосоциальных систем // Психологический журнал. 2015. Т. 36. № 6. С. 75–87.
- Каплан А. Я., Бьен Дж. Г., Тимашев С. Ф., Встовский Г. В., Пак Б. У.* Функциональная изменчивость автокорреляционной структуры ЭЭГ // Журнал высшей нервной деятельности. 2006. № 56 (3). С. 408–411.
- Костюк П. Г., Крышталь О. А., Цындренко А. Я.* Действие ионов кальция на каналы входящих и выходящих ионных токов в мембране нейронов моллюсков // Нейрофизиология. 1977. Т. 9. № 1. С. 69–76;
- Baluška F.* Recent surprising similarities between plant cells and neurons // Plant Signaling and Behavior. 2010. V. 5. № 2. P. 87–89.
- Basar E.* Chaos in brain function. Berlin–Heidelberg–N. Y.: Springer-Verlag, 1990.
- Ben-Jacob E.* Bacterial self-organization: co-enhancement of complexification and adaptability in a dynamic environment // Philosophical Transactions of the Royal Society A. London, 2003. V. 361 (1807). P. 1283–1312.
- Davenport R.* Glutamate receptors in plants // Annals of Botany. 2002. V. 90. P. 549–557.
- Derst C., Dirksen H., Meusemann K., Zhou X., Liu S., Predel R.* Evolution of neuropeptides in non-pterygote hexapods // BMC Evol. Biol. 2016 Feb. V. 29. P. 16–51.

- Emmeche C., Kull K.* Towards a Semiotic Biology: Life is the Action of Signs. L.: Imperial College Press, 2011.
- Harris-Warrick R. M.* Ion channels and receptors: molecular targets for behavioral evolution // *J. Comp. Physiol. A.* 2000, Jul–Aug. V. 186 (7–8). P. 605–16.
- Kim J.-R., Shin D., Jung S. H., Heslop-Harrison P., Cho K.* A design principle underlying the synchronization of oscillations in cellular systems // *Journal of Cell Science.* 2010. V. 123 (4). P. 537–542.
- Prindle A., Liu J., Asally M., Ly S., Garcia-Ojalvo J., Süel G. M.* Ion channels enable electrical communication within bacterial communities *Nature.* 2015 November. V. 5. № 527 (7576). P. 59–63.
- 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 / F. Baluška (Ed.). 2009. P. 267–283.