

## Эволюционный путь электрических осцилляторов

Греченко Т.Н., Харитонов А.Н., Жегалло А.В., Москва

### Evolutionary path of electric oscillators

Grechenko T.N., Kharitonov A.N., Zhegallo A.V., Moscow

Работа поддержана грантом РГНФ №14-06-00155а.

Социальное поведение, необходимое для выживания в изменяющемся мире, типично уже для ранних форм жизни и поэтому обусловлено биологическими механизмами (Олескин, 2009). Мы предполагаем, что жизнь в сообществе синхронизирует индивидуальные биологические ритмы. Чем более развит организм — тем больше индивидуальных вариаций он сохраняет. Способность к накоплению индивидуального опыта появляется в эволюции на самых ранних ступенях развития — она есть и у донервных простейших организмов (Тушмалова, 1987), а осцилляции являются механизмом актуализации этого опыта на уровне поведения.

Были проведены эксперименты, в которых регистрировалась электрическая активность от индивидуальных организмов и от их скопления (колонии или сообщества) на эволюционно древних существах: прокариотах — цианобактериях *Oscillatoria terebriformis*, *Geitlerinema sp.* и *Halothece sp.*, одноклеточных эукариотах — дрожжах *Saccharomyces cerevisiae* и инфузориях *Paramecium caudatum*, а также икринках травяной лягушки *Rana temporaria* и яйцах рачка *Artemia salina*, моллюсках *Helix pomatia* и *Helix lucorum*.

1. Опыты показали, что осцилляции, выраженные на языке электрических процессов, являются самой древней формой электрической активности — они обнаружены у цианобактерий, биологический возраст которых почти равен геологическому возрасту земли — не менее 3,5 млрд лет.

2. Осцилляции как повторяющиеся электрофизиологические явления зарегистрированы в начале жизни организмов — в наших опытах у дробящихся икринок лягушки *Rana temporaria* и яйцах рачка *Artemia salina*. Низкие частоты представлены колебаниями от 3 до 5 Гц, высокие — 28–30 Гц.

3. У цианобактерий разных видов *Oscillatoria terebriformis*, *Geitlerinema sp.* и *Halothece sp.* от индивидуальных клеток зарегистрированы осцилляции постоянной частоты (2–3 Гц), которая оставалась неизменной в течение нескольких часов.

5. У микроорганизмов, ведущих одиночный, независимый от «родственников» образ жизни — как, например, инфузории *Paramecium caudatum* — от каждого индивидуума зарегистрировано множество осцилляторов, каждый из которых характеризуется особой частотой, амплитудой, паттерном и формой колебаний. Свободно живущие подвижные микроорганизмы имеют разнообразную осцилляторную электрическую активность.

6. Такие сложные существа как моллюски имеют большое количество нервных клеток, характеризующихся наличием пейсмекерной активности. У моллюсков *Helix pomatia* и *Helix lucorum*, имеющих нервную систему, разнообразие частотных характеристик электрических осцилляций пейсмекерных нейронов чрезвычайно велико — от 0,1 Гц до 10 Гц. Поведение *Helix pomatia* и *Helix lucorum* — сложное и разнообразное (Кендел, 1980).

*Синхронизация индивидуальных ритмов необходима для формирования социальной структуры.* Цианобактерии и дрожжи (грибы) ведут малоподвижный образ жизни. Чтобы выжить в агрессивной среде, цианобактерии формируют колонии (дрожжевые клетки остаются относительно независимыми). Это позволяет им синхронизировать свои осцилляторы и осуществлять целенаправленное поведение. Регистрация электрической активности макроэлектродом в колонии цианобактерий показывает синхронизированные синусоидальные ритмы, частотой от 3–5 Гц до 30 Гц. Когда деятельность членов сообщества направлена на решение жизненно важной задачи (например, осво-

ение богатых пищей территорий, противостояние другому сообществу), то электрическая активность многих членов сообщества синхронизируется и это выражается в генерации высокоамплитудных ритмических колебаний суммарного потенциала. Осцилляции, зарегистрированные из зон, отличающихся активностью микроорганизмов, различны по частоте и амплитуде синхронизированной суммарной активности. Чем менее активен локус биопленки или колонии, тем меньше выражена синхронизация осцилляций по частоте и тем ниже амплитуда колебаний.

*Характеристики осцилляций влияют на развитие социальности.* В наших экспериментах показано, что цианобактерии имеют чрезвычайно устойчивую индивидуальную электрическую активность, для которой характерно постоянное периодичности. Цианобактерии выживают только в сообществе, и синхронизированная электрическая активность является пусковым механизмом совместной деятельности. Если по каким-то причинам синхронизации не происходит, члены сообщества погибают. Как показывают исследования, бактериальные биосоциальные системы характеризуются единым жизненным циклом, следовательно, их активность упорядочить во времени проще, чем, например, у дрожжей. У эволюционно более продвинутых дрожжевых клеток (одноклеточных эукариот — грибов) внутриклеточная регистрация выявляет наличие сложных паттернов эндогенной активности, среди которых трудно выделить электрические процессы, отражающие повторяющиеся ритмы. Это происходит также по причине множественности осцилляторов, имеющих в каждой дрожжевой клетке.

Объединившись в колонии или пленки, живая система микроорганизмов ведет себя подобно многоклеточному организму или социальному сообществу повышенной сложности. В естественных условиях роста бактерии живут в иерархически построенных организациях (Сумина, 2006). Регулятором жизни в сообществе часто бывает чувство кворума, которым бактерии пользуются, чтобы инициировать изменение поведения в зависимости от плотности бактериального населения. Чтобы решить новую проблему, они оценивают ее через коллективное чувство, реализуют индивидуальную сохраненную информацию о прошлом опыте и затем осуществляют информационный процесс, распределенный по бактериям внутри колонии ( $10^9$ – $10^{12}$  индивидуумов), создавая своеобразный «супермозг». (Ben-Jacob, 2003). Затем, благодаря механизму синхронизации, объединяют усилия для решения жизненно важной задачи. Этот процесс совершается путем морфологического усложнения колонии через иерархический временно-пространственный паттерн. Высокая сложность колонии обеспечивает степень пластичности и гибкости, требуемую для лучшей колониальной адаптации к динамичной окружающей среде. У прокариот, имеющих ограниченные биологические возможности, возникает своеобразное решение проблем, возникающих из-за их примитивного внутреннего устройства: они объединяются, создавая временный функционально специализированный «супермозг». Его работа основана на координированной синхронизированной осцилляторной активности членов сообщества.

Чем разнообразнее индивидуальные осцилляторы микроорганизма, тем меньше он нуждается в поддержке общества. Примером может быть свободно живущая инфузория, имеющая множество эндогенных осцилляторов. Дальнейшее развитие электрически выраженных осцилляций связано с появлением многоклеточных существ, нервная система которых содержит нейроны со встроенными генераторами (Соколов, 2003). Эти нейроны, выполняющие разнообразные функции, организуют и двигательную, и когнитивную деятельность высокоразвитых живых существ, включая человека (Данилова и др., 2013).

#### **Список литературы:**

1. Данилова Н.Н., Ушакова Т.Н., Волков Г.В., Плигина А.М., Страбыкина Е.А. Отображение семантических категорий в электрической активности мозга // Э.п. — 2013. — Т.6, №4. — С. 5–21.

2. Жизнь животных / Под ред. Л.А. Зенкевича. — Т. 2. — М., 1968.
3. Олескин А.В. Биосоциальность одноклеточных (на материале исследований прокариот) // Журнал общей биологии. — 2009. — Т. 70, №3. — С. 225–238.
4. Сумина Е.Л. Поведение нитчатых цианобактерий в лабораторной культуре // Микробиология. — 2006. — Т. 75, № 4. — С. 532–537.
5. Соколов Е.Н. Восприятие и условный рефлекс: новый взгляд. — М.: УМК «Психология», 2003.
6. Тушмалова Н.А. Основные закономерности эволюции поведения беспозвоночных // Физиология поведения. — Л., 1987.
7. Ben-Jacob E. Bacterial self-organization: co-enhancement of complexification and adaptability in a dynamic environment // Philos. Trans. R. Soc. Lond. A. — 2003. — 361(1807). — P. 1283–1312.

## **О механизме категоризации и его нарушениях при паркинсонизме**

*Данилова Н.Н., Страбыкина Е.А., Глозман Ж.М., Плигина А.М., Москва*

### **On categorization mechanisms and its troubles in Parkinsonism**

*Danilova N.N., Strabykina E.A., Glozman J.M., Pligina A.M., Moscow*

*Работа поддержана грантом РФФ № 14-18-03253.*

*Проблема.* Процесс категоризации является обобщением, возникающим в результате обучения, позволяющим опознавать объект по ограниченному числу признаков. Это важный механизм, который широко используется при опознании и принятии решения. Есть данные о нарушении этого процесса при болезни Паркинсона (БП), что проявляется в низком индексе семантизации при актуализации слов и замене категориальных связей ситуативными (Глозман, 1996). Поиски структур мозга, которые вносят свой вклад в процесс категоризации, вызывают споры среди исследователей. При общем согласии, что фронтальная кора вовлечена в процесс категоризации, мнение исследователей расходятся относительно роли веретенообразной извилины (Fusiform G.) — части височной доли (ВА37) между окципито-темпоральной и парагиппокампальной извилинами. Основные ее функции — обработка зрительной информации: узнавание лиц, тела человека, животных, а также неживых объектов, например типов автомобилей, а также их зрительного отображения в форме рисунков, картин или скульптур. Веретенообразная извилина принимает участие и в узнавании зрительно предъявляемых слов и чисел (Tan et al., 2011). У детей с аутизмом активность в этой зоне мозга снижена. Полагают, что опознание различных объектов тесно связано с их категориальной идентификацией, которая является одной из важных функций Fusiform G. Также имеются все основания связывать процесс категоризации с взаимодействием неокортекса со многими подкорковыми структурами, в том числе со стриопаллидарной системой, ее базальными ганглиями.

*Методика.* Для проведения исследований такого рода обычно используется регистрация нейронной активности у животных или томографические методы отображения активности мозга человека (фМРТ, ПЭТ). В нашем исследовании эта проблема разрешалась с помощью авторского метода «Микроструктурного анализа осцилляторной активности мозга» (МАО), базирующегося на пейсмекерной гипотезе ритмогенеза (Данилова, 2009; Данилова и др., 2013). МАО позволяет выявлять локальную активность в корковых и подкорковых структурах мозга на основе многоканальной ЭЭГ и вычисления эквивалентных токовых диполей узкополосных частотно-селективных генераторов, извлекаемых из состава событийно связанных потенциалов (ССП). Координаты эквивалентных диполей генераторов, пересчитываются в координаты Стереотаксического атласа мозга человека (Talairach, Tournoux, 1988). В данной работе представлены результаты исследования мозговых механизмов процессов семантической категоризации