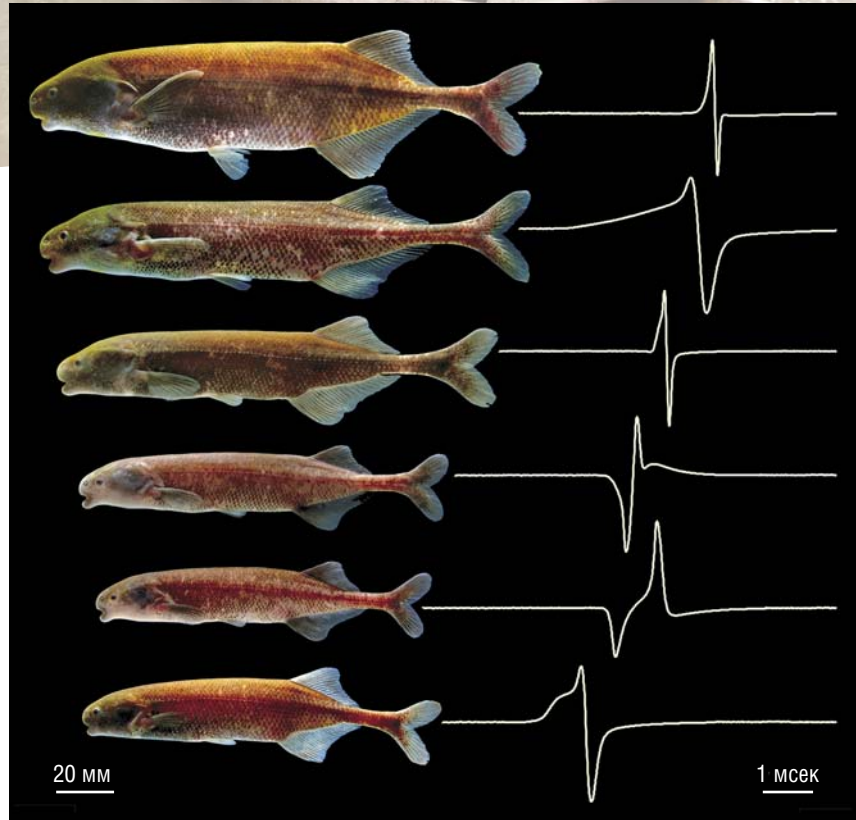


МИР ГЛАЗАМИ НАУКИ



Шестое чувство – электрическое

Когда естественный отбор работает в одном и том же направлении, а необходимые генетические «кирпичики» имеются в наличии, то в разных систематических группах могут произойти эволюционные события, повторяющие друг друга с удивительной точностью. Один из наиболее показательных примеров в этом отношении – так называемые слабоэлектрические рыбы, относящиеся к двум семействам: африканскому Mormyroidea и южноамериканскому Gymnotiformes.

Эти удивительные создания практически неизвестны широкой общественности, однако именно их исследования в течение последних десятилетий стали основой не одного прорыва в области нейробиологии. А не так давно слабоэлектрическими рыбами заинтересовались и специалисты в области эволюционной биологии, которые стараются понять, каким образом и за какое время формируются сложные признаки, чтобы пролить свет на эволюцию нервной системы, в том числе взаимодействие между новшествами в коммуникации и разнообразием видов.

Слабоэлектрические рыбы мормирусы и гимноты обитают в мутных пресноводных водоемах влажной тропической зоны, где ведут ночной образ жизни. Скелетные мышцы хвостовой части их тел формируют сложный электрический орган, который генерирует сигналы разного вида и формы, а на голове имеются электрические рецепторы, некоторые из которых можно увидеть невооруженным глазом. Часть этих рецепторов регистрирует и расшифровывает изменения собственного электрического поля: это



Слева вверху – М. Арнегард в каное на р. Окано (Африка).
Фото Д. Т. Рейда

Слева – осциллограммы электрических импульсов шести близкородственных видов мормирусов, обитающих в р. Окано (Африка). По горизонтали время, по вертикали вольтаж. Форма импульса у каждой рыбы своя. По ней рыбы выбирают себе партнера для спаривания. Отметим краткую продолжительность импульсов – от одной до трех миллисекунд. Этот коллаж М. Арнегарда получил третье место на Национальном конкурсе США БиоАрт (спонсор – Федерация американских обществ по экспериментальной биологии, FASEB). Публикуется с разрешения FASEB



Malapterurus oguensis, один из нескольких близкородственных видов электрических сомов, обитающий в Африке. Фото М. Арнегарда

© М. Арнегард, Д. Цвикл, Й. Лу, Х. Закон, 2012

Кроме слабоэлектрических рыб мормирусов и гимнот, среди рыб есть и другие виды, сформировавшие электрические органы из скелетных мышц, – электрические скаты рода *Torpedo*, звездочеты и электрические сомы. С помощью этих органов, дающих более сильные разряды, рыбы оглушают свою добычу



В небольших речушках исследователи отслеживают особей мормирусов нужного вида и пола с помощью электрода, усилителя и осциллографа.
Фото П. Макинтайра

своего рода комбинированное чувство, сочетание слуха и дистанционного осязания, позволяет рыбам «видеть» свой путь в темноте.

Посылая и принимая электрические послания, мормирусы и гимноты могут демонстрировать агрессию и готовность к спариванию. Они являются своеобразной «визитной карточкой», позволяя электрическим рыбам без ошибки узнавать особей того же вида, тем самым уменьшая вероятность спаривания с чужаками.

Ряд морфофизиологических особенностей слабоэлектрических рыб делают этих животных особо ценной моделью для нейробиологических исследований. В частности, их электрические органы богаты ключевыми нейротрансмиттерными рецепторами и ионными каналами, необходимыми для работы мышц и нервной системы. Более того, биоэлектричество играет в жизни этих животных двойную роль: это и «валюта» для обмена информацией внутри нервной системы, и энергия, с помощью которой рыбы воспринимают окружающую среду и посылают сообщения другим особям. Вышеперечисленное означает, что слабоэлек-

трическим рыбам не требуется никаких специальных форм преобразования энергии, поскольку внешние электрические импульсы непосредственно передаются в нервную систему.

Биологам, работающим с этими рыбами, пришлось подучить электротехнику. Интересно, что нервная цепь, которая позволяет электрическим рыбам избежать электрических «пробок» при взаимодействии с соседями, оказалась первой поведенческой нервной цепью позвоночных, которая была проработана в полном объеме – от ввода информации, ее централизованной обработки и заканчивая двигательной реакцией на выходе. Работа с электрическими рыбами позволила пролить свет и на целый ряд общих нейробиологических функций, в том числе адаптивную обработку *реально* поступающей информации на основе *ожидаемой*, точную временную оценку быстро меняющихся сигналов и гормональную модуляцию нервных контуров.



Торговка съестным из племени Бабонго продает маленького крокодильчика у дороги, проходящей через влажный тропический лес в северо-восточном Габоне. Жители в лесных дебрях Африки высоко ценят электрических рыб как обильную и вкусную пищу. Фото М. Арнегарда



Несмотря на независимую эволюцию, электрические органы мормирусов и гимнот – производные мышечной ткани, демонстрируют удивительную схожесть, так же как их электросенсорные системы и общий вид в целом. По: (Lavoué et al. 2012)

Весь этот клад знаний о работе нервной системы электрических рыб и их систематическое разнообразие сделали эти создания превосходной моделью для эволюционных исследований. Недавно на основании анализа последовательностей ДНК с использованием метода молекулярных часов было высказано предположение (Lavoué et al. 2012), что в каждой из групп слабоэлектрических рыб на преобразование сократительных мышц в полноценный функциональный электрический орган ушло примерно 15–25 млн лет. Оказалось, что в этом эволюционном процессе у обеих групп принял участие один и тот же ген – результат дупликации (удвоения) одного из генов, ответственных за работу натриевого канала. Ген-дубль образовался примерно за 100 млн лет до того, как окончательно выделились эти две систематические группы слабоэлектрических рыб (Arnegard et al., 2010).

Таким образом, благодаря всего лишь одной дупликации гена эволюционное новообразование было продублировано в совершенно разных, неродственных группах организмов. Более того, оказалось, что аминокислотные замены в результате позитивного отбора по этому гену у электрических рыб затронули те же сайты, где происходят нежелательные замены, приводящие к развитию сердечных или неврологических заболеваний у человека.

Недавно африканские мормирусы стали объектом изучения еще одной группы биологов-нейроэволюционистов, которые пытаются выяснить, как нововведения в коммуникации могут влиять на скорость видообразования (Carlson et al., 2011).

Оказалось, что способность генерировать электрические сигналы новых типов в сочетании с новой возмож-

ностью среднего мозга распознавать тонкие изменения сигнала позволила мормирусам существенно обогатить обмен информацией. В свою очередь, эта инновация в сфере электросенсорной коммуникации запустила каскадное образование новых видов, демонстрируя тем самым важную роль общения между особями в увеличении биоразнообразия.

Последние достижения в области генетических и геномных технологий, которые нейробиологи применяют и будут применять при исследовании слабоэлектрических рыб, помогут получить новые знания о механизмах эволюции мозга, происхождении новых систем коммуникации и их влиянии на увеличение разнообразия жизни на нашей планете.

М. Арнегард (Центр исследования рака Фреда Хатчинсона, Сиэтл, США), Д. Цвикл (Аризонский университет, США), Й. Лу и Х. Закон (Техасский университет, Остин, США)

Лумепатупа

Arnegard M.E. et al. Old gene duplication facilitates origin and diversification of an innovative communication system—twice // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2010. V. 107. P. 22172–22177.

Carlson B.A. et al. Brain evolution triggers increased diversification of electric fishes // Science. 2011. V. 332. P. 583–586.

Lavoué S. et al. Comparable ages for the independent origins of electrogenesis in African and South American weakly electric fishes // PLoS ONE 7. 2012. e36287.