



Лимонная акула закусывает подвернувшейся рыбешкой



Дуглас Филдс

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЧУВСТВО У АКУЛ

Невероятно чувствительные детекторы электрических полей помогают акулам точно нацеливаться на добычу

Угрожающий плавник прорезал поверхность моря и молниеносно заскользил к нам. Трехметровая синяя акула (*Prionace glauca*) устремилась на запах крови подобно торпедо. Когда мы наблюдали за несколькими огромными хищниками, кружащими вокруг семиметровой лодки *Boston Whaler*, серебристо-голубое рыло неожиданно высунулось из квадратного отверстия в палубе. Мы оба инстинктивно отшатнулись, хотя были в полной безопасности. Акула показала нам свои зубастые челюсти и скользнула обратно в воду.

Мы вышли в море для того, чтобы приступить к изучению загадочного «шестого чувства» у акул. В лабораторных экспериментах было показано, что эти рыбы способны ощущать чрезвычайно слабые электрические поля — наподобие тех, что производит живая клетка в морской воде. Однако требовались доказательства того, что они действительно пользуются данным чувством.

До 1970-х гг. ученые даже и не подозревали, что акулы способны

ощущать слабые электрические поля. Сейчас мы знаем, что электрорецепция помогает им находить пищу даже когда обычные пять чувств — зрение, обоняние, вкус, осязание и слух — становятся бесполезными. Электрорецепция работает в мутной воде, в полной темноте и даже помогает обнаружить жертву, зарывшуюся в песок.

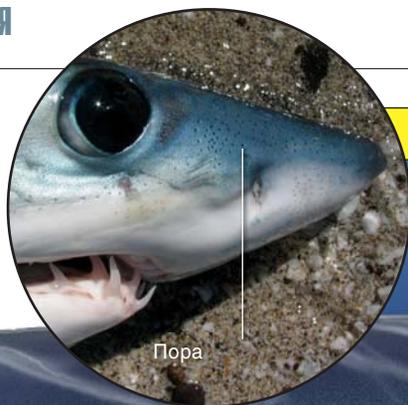
Тайное чувство

В 1678 г. итальянский анатом Стефано Лоренцини (Stefano Lorenzini) описал у акул поры, которые усеивают переднюю часть их головы и придают им несколько «небритый» вид. Он отметил, что поры концентрируются вокруг рта рыбы, и обнаружил, что каждое отверстие ведет в длинную трубочку, заполненную прозрачным гелем. Некоторые из них — тонкие и короткие, в то время как другие достигают толщины спагетти и тянутся на несколько сантиметров. Лоренцини обнаружил, что глубоко в тканях головы эти трубочки сходятся в несколько больших полостей, заполненных прозрачным желе. Он рассмотрел

и отверг возможность того, что поры являются железами, выделяющими слизь. Позднее он предположил, что они могут иметь другую, «более скрытую» функцию, однако их настоящая роль продолжала оставаться неясной на протяжении нескольких столетий.

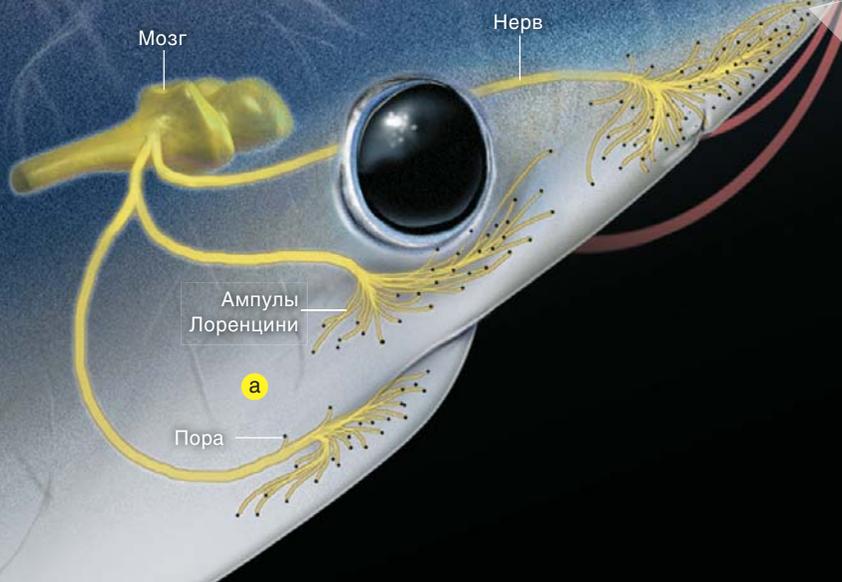
Назначение пор стало чуть более понятным в середине XIX в., когда исследователи начали разгадывать функцию так называемой боковой линии — органа, который имеет некоторое сходство с системой пор и трубочек, открытых Лоренцини. Боковая линия представляет собой полосу, проходящую по боковой стороне тела многих рыб и амфибий от жабр до хвоста, и предназначена для детекции движения воды. У рыб она состоит из специализированного ряда перфорированных чешуек, каждая из которых открывается в трубку, идущую под кожей вдоль всего тела. В расширениях, располагающихся по длине трубки, находятся чувствительные волосковые клетки (тончайшие выросты или реснички), которые обращены в полость трубки наподобие щетки. ▶

ЭЛЕКТРОРЕЦЕПЦИЯ В ДЕЙСТВИИ



АТЛАНТИЧЕСКАЯ СЕРО-ГОЛУБАЯ АКУЛА

Акулы и родственные им виды ощущают чрезвычайно слабые электрические поля, генерируемые другими животными в морской воде, благодаря сотням или даже тысячам специализированных детекторов на рыле, называемых ампулами Лоренцини (а). Электрическое поле проводится по хорошо изолированным каналам (b), которые заполнены гелем и тянутся от поверхности кожи к луковицеобразным ампулам (c), выстланным одним слоем чувствительных клеток (d). Эти клетки, реагирующие даже на незначительные изменения электрического заряда геля в канале, в свою очередь активируют нервы, по которым в мозг отправляется информация о присутствии электрического поля



Слабейшие движения воды, возникающие, например, когда другая рыба плывет на расстоянии одного метра, сгибают реснички подобно тому, как по пшеничному полю гуляют волны от ветра. При этом по нервам передаются импульсы, сообщающие мозгу о силе и направлении движения воды.

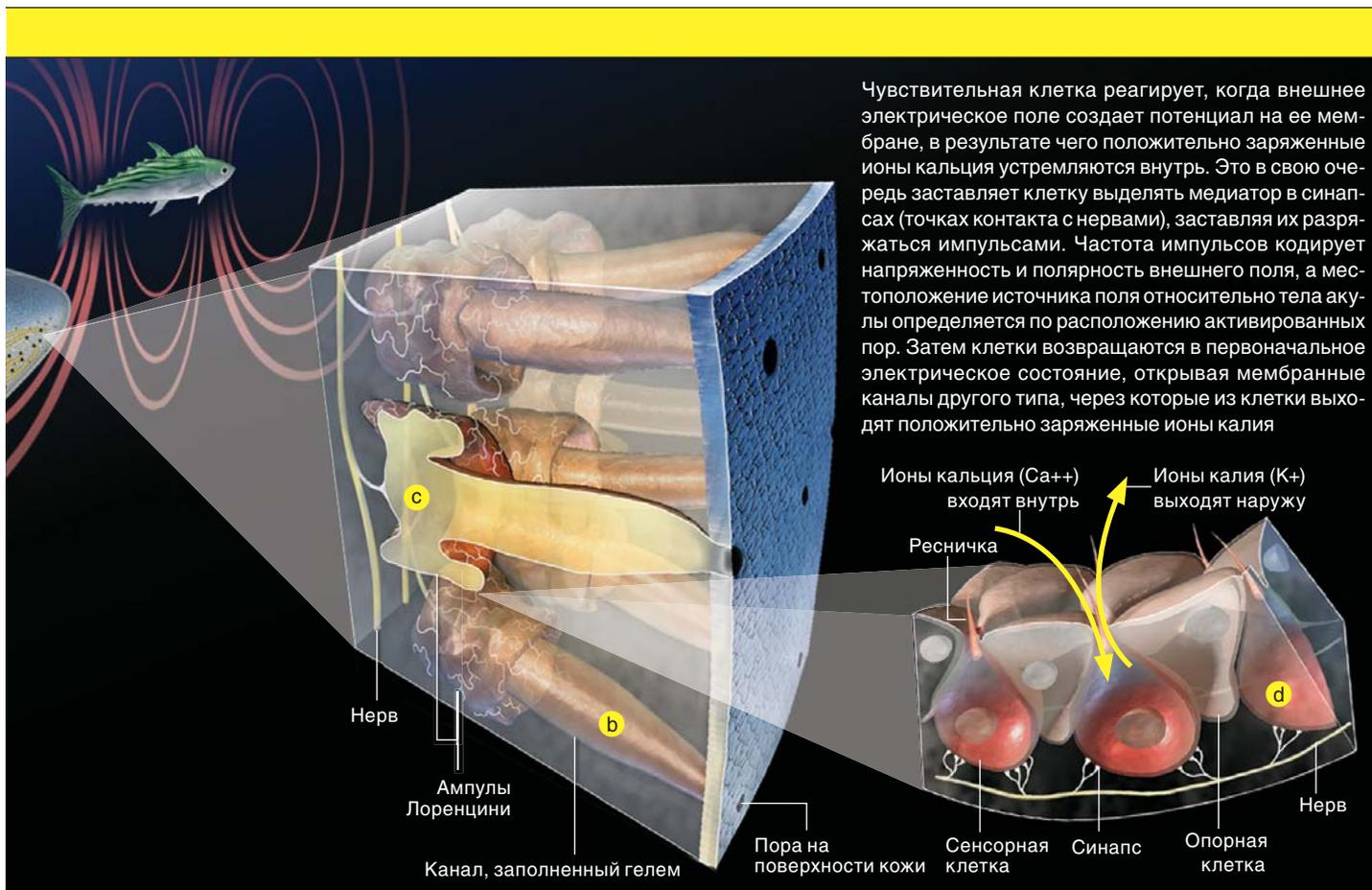
К концу XIX в. с помощью новых усовершенствованных микроскопов было обнаружено, что поры на рыле акулы и необычные структуры под ними, которые мы сейчас

Акула способна обнаружить одну миллионную долю вольта на сантиметр морской воды. Такой же градиент потенциала могла бы создать полувольтовая пальчиковая батарейка, один конец которой был бы погружен в море в проливе Лонг-Айленд, а другой — в водах около Джэксонвилла в штате Флорида

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Акулы и родственные им рыбы обладают редкой способностью ощущать чрезвычайно слабые электрические поля, возникающие в воде вокруг живых организмов.
- Это чувство обеспечивается уникальными электрорецептивными образованиями, названными ампулами Лоренцини в честь впервые описавшего их анатома XVII в.
- Акулы используют свое «шестое чувство» для того, чтобы точно нацеливаться на добычу в заключительной фазе нападения. Роль электрорецепции в других видах поведения пока остается не изученной.

называем ампулами Лоренцини, представляют собой сенсорные органы. Каждая трубочка заканчивается карманом в форме луковицы, или ампулой, от которой отходит тонкий нерв, соединяющийся с другим нервом, идущим от боковой линии. Ученые проследили ход этих нервов до основания черепа, где они попадают в мозг через дорсальную



Чувствительная клетка реагирует, когда внешнее электрическое поле создает потенциал на ее мембране, в результате чего положительно заряженные ионы кальция устремляются внутрь. Это в свою очередь заставляет клетку выделять медиатор в синапсах (точках контакта с нервами), заставляя их разряжаться импульсами. Частота импульсов кодирует напряженность и полярность внешнего поля, а местоположение источника поля относительно тела акулы определяется по расположению активированных пор. Затем клетки возвращаются в первоначальное электрическое состояние, открывая мембранные каналы другого типа, через которые из клетки выходят положительно заряженные ионы калия

поверхность продолговатого мозга. Внутри каждой ампулы был выявлен одинарный слой крошечных волосковых клеток, сходных с аналогичными клетками внутреннего уха человека и боковой линии рыб. Однако оставалось не ясным, какие же стимулы воспринимаются с помощью данных органов.

Электрорецепция подтверждена

Исследователи столкнулись с проблемой: как определить функцию совершенно чуждого нам органа? В конце концов, благодаря сочетанию хорошей аппаратуры и богатой фантазии решение было найдено.

В 1909 г. биолог Г.Х. Паркер (G.H. Parker) из Гарвардского университета удалил у морских собак кожу вокруг отверстий, соединявших ампулы с окружающей средой. Он обнаружил, что несмотря на операцию рыбы реагировали на

легкое прикосновение к трубкам. Наличие такой реакции могло свидетельствовать о том, что благодаря этим органам они способны ощущать движение или давление воды. (В конце концов, наличие рефлекторной реакции на удар в глаз вовсе не означает, что этот орган развился специально для того, чтобы воспринимать неожиданные тычки).

В 1938 г. Александру Сэнду (Alexander Sand) из Морской биологической ассоциации в Плимуте, Великобритания, удалось усилить и записать нервные импульсы, идущие от ампул Лоренцини в мозг. Он обнаружил, что импульсы направлялись непрерывным потоком, но определенные стимулы резко повышали или снижали их частоту. Сэнд, как и Паркер, отметил, что эти органы отвечают на прикосновение и давление, а при охлаждении частота разряда повышается. Ампулы Лоренцини оказались

настолько чувствительны к температуре, что могли воспринимать изменения во внешней среде всего на 0,2° С. Тогда исследователи решили, что эти органы являются тепловыми рецепторами.

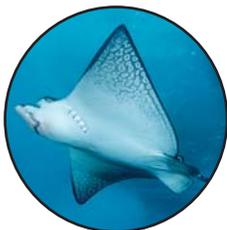
В начале 1960-х гг. биолог Р.У. Мюррей (R.W. Murray) из Бирмингемского университета в Англии повторил эксперименты Сэнда с помощью современных электрофизиологических приборов и подтвердил наличие реакций на изменения температуры и давления, а также на прикосновения. Однако он заметил, что исследуемые органы чувствительны к слабым изменениям солености воды. Когда он случайно создал электрическое поле около места выхода трубки, соединяющейся с ампулой, паттерн разряда изменился. Более того, импульсация менялась в соответствии с интенсивностью и полярностью поля. Если к отверстию ампулы приближался ▶

РЫБЫ С ШЕСТЫМ ЧУВСТВОМ

ПОМИМО АКУЛ АНАЛОГИЧНЫМИ АМПУЛЯРНЫМИ ЭЛЕКТРОРЕЦЕПТОРАМИ ОБЛАДАЮТ И НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ РЫБЫ

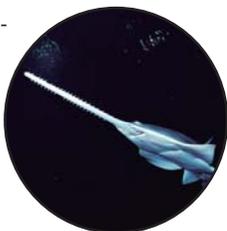
ОБЫКНОВЕННЫЕ СКАТЫ

в поисках пищи планируют на своих грудных плавниках над морским дном



РЫБА-ПИЛА

имеет пилообразный рострум (вырост верхней челюсти), покрытый порами, которые чувствительны к движению и к электрическим полям. Это позволяет рыбе находить пищу на океанском дне под слоем песка



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СКАТЫ

обладают органами, способными произвести электрический разряд, оглушающий жертву



ОСЕТРЫ

пользуются своим клинообразным рострумом и чувствительными усами для поиска пищи в донном иле



ДВОЯКОДЫШАЩИЕ РЫБЫ

способны дышать воздухом и приспособлены к жизни в мутной пресной воде



положительный полюс, частота разряда снижалась; если же ближе оказывался отрицательный полюс, разряд становился более частым.

Поразительно, но, согласно данным Мюррея, эти органы способны реагировать на очень слабое поле — всего в одну миллионную долю вольта на сантиметр морской воды. Примерно такой же градиент потенциала могла бы создать полувольтовая пальчиковая батарейка, один конец которой был бы погружен в море в проливе Лонг-Айленд, а другой — в водах около Джэксонвилла в штате Флорида. Теоретически, акула, плавающая между этими двумя точками, могла бы с легкостью определить, включена батарейка или выключена. (Проведенное позднее исследование реакций в мозге показало, что эти хищники могут различать всего 15 миллиардных долей вольта.) Ни одна другая ткань, орган или животное не обладают подобной чувствительностью к электричеству. Даже инженерам, вооруженным современным оборудованием, сложно измерять столь слабые поля в морской воде.

В поисках функции

Почему акулы ощущают слабые электрические поля? Ответить на этот вопрос помогли проводившиеся ранее исследования «биоэлектричества» других рыб. Например, электрические угри поражают свою жертву сильным ударом электрического тока, вырабатываемого специализированным органом. Однако некоторые другие виды рыб, видимо, специально, генерируют значительно более слабые электрические поля, слишком безобидные, чтобы служить оружием. Эволюция данных органов, кажущихся бесполезными, озадачила в свое время даже Чарлза Дарвина, пытавшегося разгадать биологическую загадку в «Происхождении видов».

Зоолог Ганс Лиссманн (H.W. Lissmann) из Кембриджского университета совместно с другими учеными в 1950-х гг. обнаружил, что рыбы, генерирующие электрическое поле, способны его и воспринимать.

Их сенсоры (бугорковые рецепторы) значительно отличаются от ампул Лоренцини: у них отсутствуют длинные трубочки и они не столь чувствительны к электрическим полям.

Действуя совместно, электрические органы и бугорковые рецепторы функционируют как излучатель и приемник радара. Такая система чрезвычайно полезна, скажем, при передвижениях в мутной воде Амазонки или при охоте в ночное время. Объекты в воде искажают форму излучаемого электрического поля, бугорковые рецепторы улавливают разницу и тем самым позволяют обнаруживать объекты.

Акулы и скаты не имеют специализированных органов для создания электрического поля. Исследователи предположили, что чрезвычайно чувствительные ампулы Лоренцини работают как пассивный радар, определяя слабейшие электрические поля, которые возникают в окружающей среде естественным образом — примерно так же, как прибор ночного видения позволяет разглядеть ночное поле боя, усиливая слабый свет звезд.

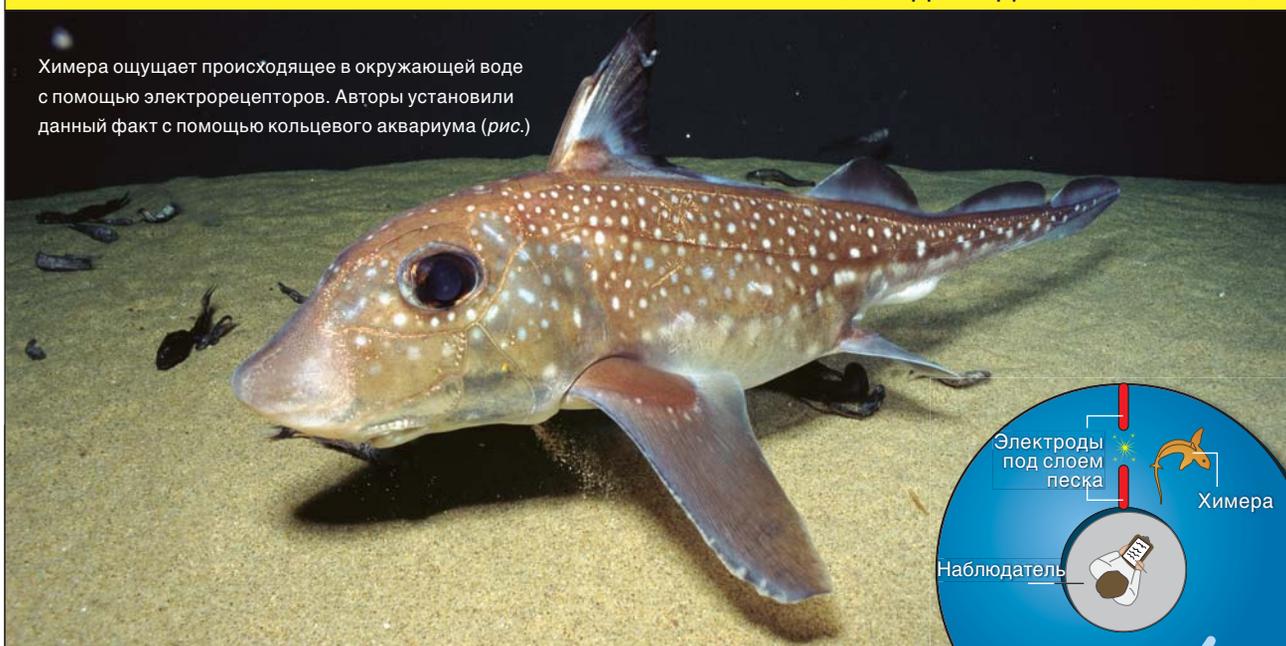
Возможно, эти животные ощущают быстрые и слабые формы биоэлектричества, подобные электрическим волнам мозга или потенциалам, возникающим при сокращении сердца. Казалось маловероятным, что с помощью ампул Лоренцини акулы обнаруживают электрические импульсы длительностью всего в несколько тысячных долей секунды. Скорее наоборот, эти органы способны воспринимать лишь медленно изменяющиеся электрические поля, подобные тем, которые возникают в электрохимических батарейках.

Такой вариант восприятия также может иметь смысл, поскольку все клетки организма по своей природе подобны батарейкам. Потенциал возникает в том случае, когда два различных раствора солей оказываются разделены в электрохимической ячейке. Противоположные заряды притягиваются, и возникающее при этом движение зарядов

FRED BAVENDAM Minden Pictures (ray); NORBERT WU Minden Pictures (sawfish); STEPHEN FRINK Corbis (electric ray); WIL MEINDERTS Foto Natura/Minden Pictures (sturgeon); JEAN-PAUL FERRERO Auscape/Minden Pictures (lungfish)

ИССЛЕДУЕМ ДРЕВНЕЕ ЧУВСТВО

Химера ощущает происходящее в окружающей воде с помощью электрорецепторов. Авторы установили данный факт с помощью кольцевого аквариума (рис.)



Акулы были не первыми рыбами, воспринимавшими электрические поля. Ранее эту способность имели их давно вымершие предки. В начале своих исследований меня заинтересовало, обладает ли электрорецепцией диковинная рыба, произошедшая от тех же давно исчезнувших видов, — примитивный житель глубин океана, называемый химерой.

Впервые я столкнулся с этими странными рыбами в конце 1970-х гг. на коммерческом рыболовном траулере, будучи студентом Морской лаборатории в Мосс-Лендинге в Калифорнии. Химеры имеют большие передние зубы, которые не позволяют рту плотно закрываться. Такая особенность и большие глаза делают их немного похожими на кролика или крысу.

Поскольку химера не имеет никакой коммерческой ценности, капитан позволил мне взять ее домой для исследования. Вскоре я заметил, что пространство внутри ее головы между кожей и мышцами заполнено прозрачной желеобразной массой. Направив свет, я увидел переплетение прозрачных, заполненных гелем трубочек, расходящихся к порам на поверхности головы, которые напоминали ампулы Лоренцини у акул. Я подумал, что химеры тоже обладают подобными органами. Для подтверждения данного предположения мне нужно было поймать неповрежденный экземпляр и содержать его живым во время экспериментов.

Я обратился за помощью к командам коммерческих рыболовных судов, бороздящих воды залива Монтерей. Одним туманным утром корабль «Холидей-II» доставил мне живую химеру. Вернувшись в лабораторию, я поместил рыбу в аквариум кольцевой формы, в котором непрерывно циркулировала морская вода (рис.). Центр кольца был достаточно просторным, чтобы я мог стоять посередине и наблюдать, как рыба плавает против течения воды (предпочитаемое ими направление).

Вскоре я понял, что данная склонность химеры поможет ответить на мои вопросы. Сначала я зарыл электроды в песок. Когда рыба проплывала над ними, я включал электрическое поле и одновременно слегка дотрагивался до рыбы стеклянной палочкой, заставляя ее разворачиваться и плыть по течению воды. Вскоре она вновь выбирала свое любимое направление. Я предположил, что если химера способна ощущать слабое электрическое поле, то начнет ассоциировать его с досаждающей ей стеклянной палочкой. В таком случае она бы сама поворачивала сразу, как

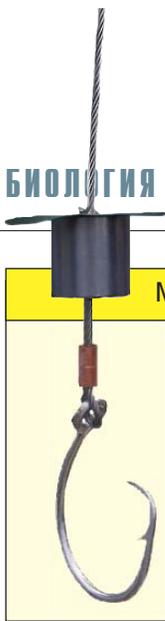
только я щелкну выключателем. Если животное так бы этому и не научилось, то это означало бы, что либо оно не может ощущать слабые электрические поля, либо неспособно к обучению.

Наконец я добился искомого результата. Я нажимал на выключатель, и химера сразу же изменяла направление движения. Она чувствовала электрическое поле и усвоила закономерность сочетания стимулов. С тех пор каждый раз, как только я включал электрический стимул, рыба поворачивала, однако проплывала над теми же электродами без малейших колебаний при выключенном поле. Изменяя интенсивность и частоту поля, я обнаружил, что химеры могут с легкостью воспринимать поля столь же слабые, как и те, которые образуются вокруг тела рыб в морской воде.

Итак, эксперимент показал, что химера способна воспринимать слабые электрические поля. Однако еще требовались доказательства того, что рыба использует те же структуры, которые напоминают ампулы Лоренцини. Мы вместе с электрофизиологом Дэвидом Лэнджем (David Lange) из Скриппсовского института океанографии приступили к изучению данного вопроса. Повторяя подход, примененный Александром Сэндом (Alexander Sand) в 1938 г., мы регистрировали активность нервов, идущих от ампул. Когда от этих таинственных органов в мозг устремлялся нервный импульс, по экрану осциллографа проносилась зеленая флуоресцирующая волна, и в громкоговорителе раздавался громкий щелчок.

Пока рыба мирно спала под наркозом, частота разряда нерва слегка пульсировала в такт с дыханием. Однако когда около места выхода поры на поверхность мы создавали электрическое поле, лаборатория немедленно наполнялась громким треском, отражающим поток нервных импульсов, бегущих в мозг. Затем мы сделали электрическое поле пульсирующим, и импульсы четко следовали за ним, будто морские пехотинцы на параде. Изменяя полярность, мы показали, что отрицательный полюс возбуждает орган, в то время как положительный — тормозит. Теперь уже не оставалось сомнений в том, что химеры обладают электрорецепторами. Дальнейшие исследования показали, что электрочувствительные органы этих рыб идентичны таковым у акул.





МАГНИТНЫЕ РЕПЕЛЛЕНТЫ?

Ученые ищут способ отгонять акул от рыболовных снастей и даже от пловцов, нарушая работу их чувствительных электрорецепторов с помощью сильных магнитов. Идея состоит в том, чтобы сбить с толку электрорецепторы акулы, вызывая генерацию электрического поля внутри них при перемещении в магнитном поле.

«Наша цель — спасти акул, а не людей», — объясняет Сэмюэл Грабер (Samuel Gruber), морской биолог из Университета Майами. По оценкам Всемирного фонда дикой природы, 20% видов этих хищников находятся под угрозой исчезновения. «Если укрепить такие устройства на коммерческих орудиях лова, то они помогут спасти 50 тыс. акул за одну ночь», — говорит Грабер.

создает электрический ток. Аналогично живые клетки организма содержат солевой раствор, отличающийся по составу от морской воды, что порождает на границе между ними электрический потенциал. Следовательно, тело рыбы в морской воде действует как батарейка, создающая вокруг себя электрическое поле (причем оно медленно колеблется, когда рыба прокачивает воду через свои жабры).

В 1970-х гг. биолог Адрианус Калмийн (Adrianus Kalmijn) из Скриппсовского института океанографии, воспользовавшись электронным усилителем, показал, что животные, находящиеся в морской воде, излучают вокруг себя биоэлектрическое поле, которое со временем незначительно меняется или же остается неизменным. Ученый также обнаружил, что в неволе акула находит и атакует электроды, зарытые в песок на дне аквариума, — при условии, что они генерируют электрические поля, имитирующие излучение от обычной добычи хищника.

Электрорецепция на свободе

Показать, что рыбы с ампулами Лоренцини реагируют на электрические поля в контролируемых лабораторных условиях, — одно дело, однако еще необходимо определить,

используют ли они это чувство в привычной для них среде обитания, и если да, то как именно. Такая задача непростая отчасти потому, что слабые электрические сигналы от добычи возникают на фоне электрического шума, обусловленного природными явлениями — соленостью, температурой, током воды, кислотностью и т.д. В океанской воде даже кусок металлической проволоки создает потенциал, легко улавливаемый акулой.

Для того чтобы посмотреть, как рыбы применяют эту сенсорную способность в природе, в том числе во время охоты, мы должны были наблюдать за ними в море — поэтому мы и оказались в небольшой лодке из стеклопластика (а не из металла) с квадратным отверстием в палубе.

Выйдя в море, мы опустили T-образный аппарат с электродами на концах через квадратный вырез и бросили в воду рыбный фарш. Затем подали на электроды ток, чтобы симитировать электрические поля, создаваемые рыбами, служащими обычной добычей акул. Один из нас активировал электроды по очереди в случайном порядке, в то время как другой (не зная, какой именно электрод активирован в данный момент) наблюдал за поведением акул. Если бы животные

преимущественно атаковали активированный электрод, то мы бы получили подтверждение того, что они пользуются своим электрическим чувством при ловле добычи.

В первую ночь гигантская голубая акула кружила поблизости от лодки, а затем ринулась на запах рыбного фарша. Она плыла прямо на источник запаха и в последний момент резко приняла вправо, схватив зубами правую штангу нашего аппарата, после чего резко дернулась и отпустила ее. В последний момент нападения хищник перестал обращать внимание на приманку и принялся кусать активированный электрод. Мы наблюдали множество подобных атак, в которых животные явно отдавали предпочтение активированному электроду по сравнению с неактивированным, а также с источником пищевого запаха.

В последние моменты нападения электрорецепция для акулы имеет даже большее значение, чем воздействие на системы обоняния и вкуса. Данное открытие может объяснить некоторые наблюдения, сделанные во время реальных случаев нападения этих рыб на людей. Сообщалось о том, что жертва акул подвергалась повторным атакам, в то время как хищник совершенно игнорировал другого человека, занятого буксированием пострадавшего. Акула теряет след своей первоначальной жертвы, когда кровь нарушает ее зрительное и обонятельное восприятие. Именно электрорецепция позволяет ей видеть сильные электрические поля, возникающие из-за разницы в солевом составе морской воды и крови, вытекающей из раны жертвы.

Во время охоты акулы используют все органы чувств, у каждого из которых есть свои преимущества и особенности восприятия (*врезка на противоположной стр.*). Обоняние и слух необходимы для обнаружения жертвы на больших расстояниях. Зрение, чувство боковой линии и вкус важны на более коротких дистанциях. Однако в последней фазе атаки, когда акула приближается к своей добыче при-

ОБ АВТОРЕ

Дуглас Филдс (R. Douglas Fields) — нейробиолог, работает в системе Национальных институтов здоровья, имеет степень магистра в Морской лаборатории в Мосс-Лендинге в Калифорнии, а также докторскую степень в области биологической океанографии в Скриппсовском институте океанографии. Филдс исследует акул, а в свободное от работы время занимается скалолазанием, подводным плаванием и изготовлением гитар.

ЧУВСТВА АКУЛЫ ВО ВРЕМЯ ОХОТЫ

На охоте акула использует все свои органы чувств

1 На значительных расстояниях от потенциальной жертвы большую роль играют обоняние и слух. Раненая, а потому и более уязвимая рыба оставляет след с запахом крови и производит шум

Мозг
Ухо
Нос

2 Когда хищник подплывает к жертве ближе, более важными становятся его зрение, вкус и способность улавливать движение воды (с помощью боковой линии)

Боковая линия

3 Электрорецепторы

3 В заключительной фазе нападения, когда акула приближается к жертве ближе 1 м, электрорецепция становится основным чувством, позволяющим точно определить местонахождение жертвы и правильно сориентировать челюсти. Теперь акула совершает свой заключительный смертельный бросок

мерно на 1 м, электрорецепция позволяет ей точно засечь местонахождение жертвы и правильно сориентировать на нее свои челюсти. Это открытие, возможно, когда-нибудь позволит создать устройства, отпугивающие акул от пловцов.

Несомненно, акулы, обладая электрорецепцией, используют ее и для других целей. Мы можем лишь догадываться, как они воспринимают мир с помощью такого странного и совершенно чуждого нам чувства. ■

Перевод: Б.В. Чернышев

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- The Electric Sense of Sharks and Rays. A.J. Kalmijn in *Journal of Experimental Biology*, Vol. 55, pages 371—383; 1971.
- Electrorception in the Ratfish (*Hydrolagus colliei*). R.D. Fields and G.D. Lange in *Science*, Vol. 207, pages 547—548; 1980.
- Ampullary Sense Organs, Peripheral, Central and Behavioral Electrorception in Chimaeras (*Hydrolagus*, *Holocephali*, *Chondrich-thyes*). R.D. Fields, T.H. Bullcock and G.D. Lange in *Brain, Behavior and Evolution*, Vol. 41, pages 269—289; 1993.