

РЕМОНТ ОРГАНОВ

Позабывтая структура,
восстанавливающая ткани

ПОБЕДА ДЕНГЕ?

Программа вакцинации против
лихорадки денге терпит неудачу

НЕ ТОЛЬКО ДАМБЫ

Как защитить береговую линию
в согласии с природой

В мире науки

**SCIENTIFIC
AMERICAN**

Ежемесячный
научно-информационный
журнал

www.sci-ru.org

5/6 2019

12+

ЧТЕЦ МЫСЛЕЙ

Новый нейрокомпьютерный интерфейс
угадывает желания пользователя

ПЛЮС

**РЕДКИЕ
ОПУХОЛИ**

Перспективы развития
онкологической науки в России





4



118

Темы номера

НЕЙРОТЕХНОЛОГИИ

Машина желаний

Ричард Андерсен

Нейрокомпьютерный интерфейс нового поколения понимает, чего хочет человек

АСТРОФИЗИКА

Внутренняя жизнь нейтронных звезд 14

Клара Москович

Недра нейтронных звезд, самой плотной формы вещества во Вселенной, долгое время хранили тайну, которую ученые начинают постигать только сейчас

МЕДИЦИНА

Рак надо знать в лицо 22

Наталья Лескова

О перспективах развития онкологической науки и практики в России — главный онколог России академик **Андрей Каприн** и доктор медицинских наук **Александр Феденко**

Попытка регенерации

Виравут Инь и Кевин Стрэнддж

Для отвергнутого ранее лекарственного вещества показана способность восстанавливать органы, поврежденные из-за болезни или травмы



84

СОДЕРЖАНИЕ

Май/июнь 2019

ЗДРАВООХРАНЕНИЕ

Фиаско с денге 38

Мадхусри Мукерджи и Сима Ясин

Делает ли мгновенная иммунная реакция небезопасной вакцину против лихорадки денге?

ХИМИЯ

Мир молекулярных машин 50

Ольга Беленицкая

На общем собрании РАН в конце апреля этого года диплом иностранного члена академии был вручен лауреату Нобелевской премии 2016 г. **Жан-Пьеру Соважу**



БИОЛОГИЯ

Распутать геном 58

Эрез Либерман Эйден

Новые данные о механизме образования петель в геномной ДНК свидетельствуют об их участии в регуляции активности генов



30

ПОВЕДЕНИЕ ЖИВОТНЫХ

Скорбь косатки 68

Барбара Кинг

Огромное число новых наблюдений позволяет понять, почему одни виды животных переживают горе, а другие — нет



126



38

ПАЛЕОНТОЛОГИЯ

Академик Михаил Федонкин:

«Жизнь — неизбежное явление»

О том, каким образом формировалась жизнь на Земле, — наш разговор с академиком **Михилом Федонкиным**

76



ПСИХИАТРИЯ

Непризнанная болезнь

Саймон Макин

У сотен тысяч людей бывает мания и никогда не бывает депрессии. Почему психиатры настаивают, что это надо называть биполярным расстройством?

84

ПСИХОЛОГИЯ

Почему мы верим в теории заговора

Мелинда Уэннер Мойер

Некоторые эмоции провоцируют необоснованные предположения, которые могут угрожать нашей безопасности и демократии

92

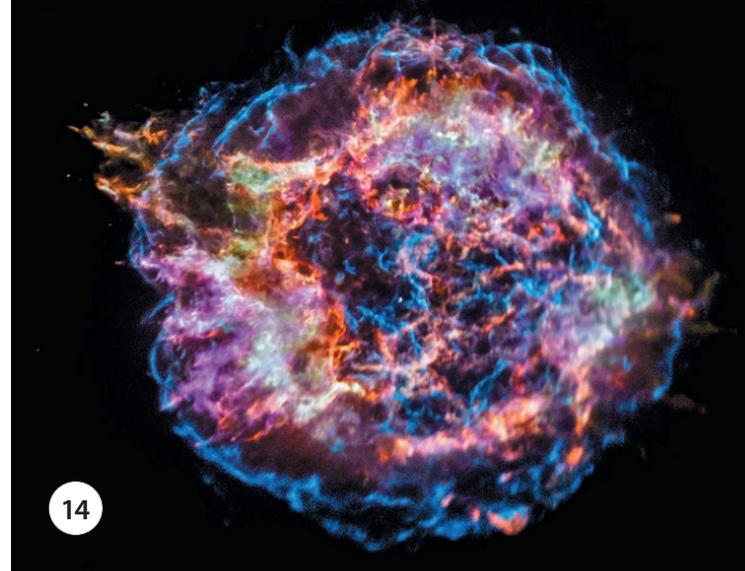
ФИЗИКА

Квантовая гравитация в лаборатории

Тим Фолджер

Новые эксперименты дают возможность проверить квантовую природу гравитации буквально на лабораторном столе

100



14

БИОФИЗИКА

Жизнь моря говорит о себе светом

110

Ольга Беленицкая

Академик **Иосиф Гительзон** удостоен высшей награды РАН за обоснование и развитие экологического направления в биофизике



АРХЕОЛОГИЯ

Кто еще использует орудия

118

Майкл Хаслам

Находки каменных орудий, оставленных нечеловекообразными приматами, проливают свет на происхождение технологических изобретений

ИНФРАСТРУКТУРА

По ту сторону дамб

126

Роуэн Джейкобсен

Укрепленные заболоченные участки могут защитить береговую линию лучше, чем сооружения из твердых материалов

КЛИМАТ

Усилитель непогоды

134

Майкл Мани

Необычные волны струйного течения предвещают аномальную жару и потопы в будущем

Разделы

От редакции

3

50, 100, 150 лет тому назад

99, 144



68



92

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Наши партнеры:



PETER



SERVICE



Сибирское отделение РАН



РОСАТОМ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



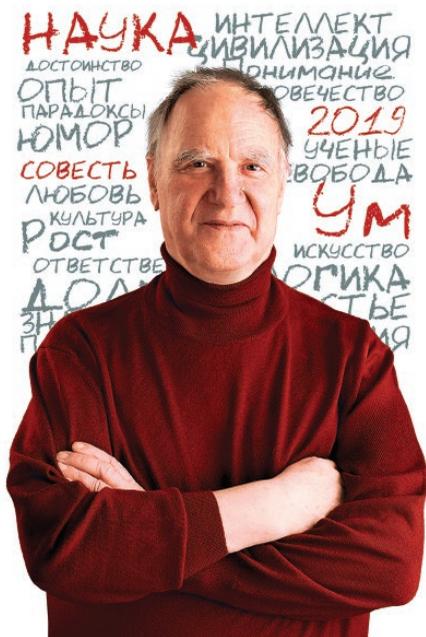
очевидное
невероятное



ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛ

Научная Россия

Основатель и первый главный редактор
журнала «В мире науки / Scientific American»
профессор Сергей Петрович Капица



Учредитель и издатель:

Некоммерческое партнерство «Международное партнерство
распространения научных знаний»

Главный редактор:

В.Е. Фортвов

Главный научный консультант:

президент РАН академик А.М. Сергеев

Ответственный секретарь:

О.Л. Беленицкая

Зав. отделом иностранных материалов:

А.Ю. Мостинская

Шеф-редактор иностранных материалов:

В.Д. Ардаматская

Зав. отделом российских материалов:

О.Л. Беленицкая

Выпускающий редактор:

М.А. Янушкевич

Обозреватели:

В.С. Губарев, В.Ю. Чумаков

Администратор редакции:

О.М. Горлова

Научные консультанты:

академик И.И. Гительзон; член-корр. РАН Ю.Г. Горбунова; академик А.Д. Каприн; академик Ж.-П. Соваж;
д.м.н. А.А. Феденко; академик М.А. Федонкин

Над номером работали:

М.С. Багоцкая, А.П. Кузнецов, С.М. Левензон, Н.Л. Лескова, А.И. Прокопенко, О.С. Сажина,
В.И. Сидорова, Н.Н. Шаfranовская

Дизайнер:

Д.А. Гранков

Верстка:

А.Р. Гукасян

Корректур:

Я.Т. Лебедева

Президент координационного совета НП «Международное партнерство распространения научных знаний»:

В.Е. Фортвов

Директор НП «Международное партнерство распространения научных знаний»:

В.К. Рыбникова

Финансовый директор:

Л.И. Гапоненко

Главный бухгалтер:

Ю.В. Калинкина

Адрес редакции:

Москва, ул. Ленинские горы, 1, к. 46, офис 138;

тел./факс: 8 (495) 939-42-66; e-mail: info@sciam.ru; www.sciam.ru

Иллюстрации предоставлены Scientific American, Inc.

Отпечатано:



ОАО «Можайский полиграфический комбинат», 143200, г. Можайск, ул. Мира, 93,
www.oaompk.ru, www.oaompk.pf, тел.: 8 (495) 745-84-28, 8 (4963) 82-06-85

Заказ № 0234

© В МИРЕ НАУКИ. Журнал зарегистрирован в Комитете РФ по печати. Свидетельство ПИ
№ ФС77-43636 от 18 января 2011 г.

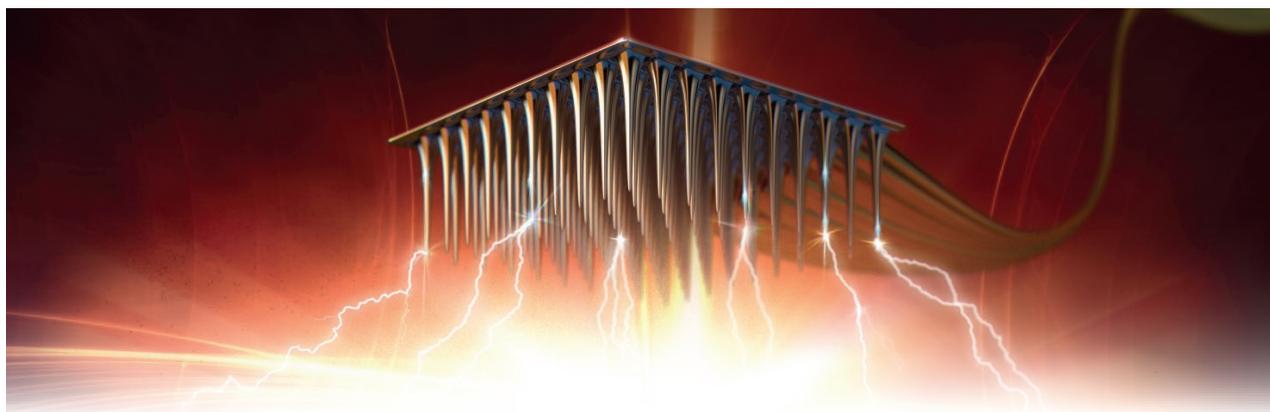
Тираж: 12 500 экземпляров

Цена договорная

Авторские права НП «Международное партнерство распространения научных знаний».

© Все права защищены. Некоторые из материалов данного номера были ранее опубликованы Scientific American или его аффилированными лицами и используются по лицензии Scientific American. Перепечатка текстов и иллюстраций только с письменного согласия редакции. При цитировании ссылка на «В мире науки» обязательна. Редакция не всегда разделяет точку зрения авторов и не несет ответственности за содержание рекламных материалов. Рукописи не рецензируются и не возвращаются.

Торговая марка Scientific American, ее текст и шрифтовое оформление являются исключительной собственностью Scientific American, Inc. и использованы здесь в соответствии с лицензионным договором.



«Возмутительные» объекты и другие приключения в науке

«У меня мурашки бегут по коже каждый раз, когда я это вижу». Этой цитатой из статьи двойного номера журнала начинается представление американского контента главный редактор *Scientific American* Мариэтт Ди Кристина. Что же заставило автора статьи «Машина желаний», ученого-нейрофизиолога Ричарда Андерсена, покрыться мурашками? Автор пишет о парализованном человеке, передвигающемся в инвалидной коляске и мысленно отдающем команды компьютеру или роботизированной конечности. Существующие интерфейсы пока не обладают достаточными точностью и скоростью; новые версии, возможно, будут помещаться в области мозга, что позволит им отслеживать намерение человека совершить то или иное движение.

«Самый возмутительный объект, о котором большинство людей никогда не слышали», как называет его один из ученых, — тема статьи «Внутренняя жизнь нейтронных звезд». Что же это за интригующий объект? Речь идет о странных космических сущностях, в которых масса примерно двух звезд упакована в пространство размером не более чем большой город. Они появились на свет, когда умирали и коллапсировали звезды. Недра нейтронных звезд — самой плотной формы вещества во Вселенной —

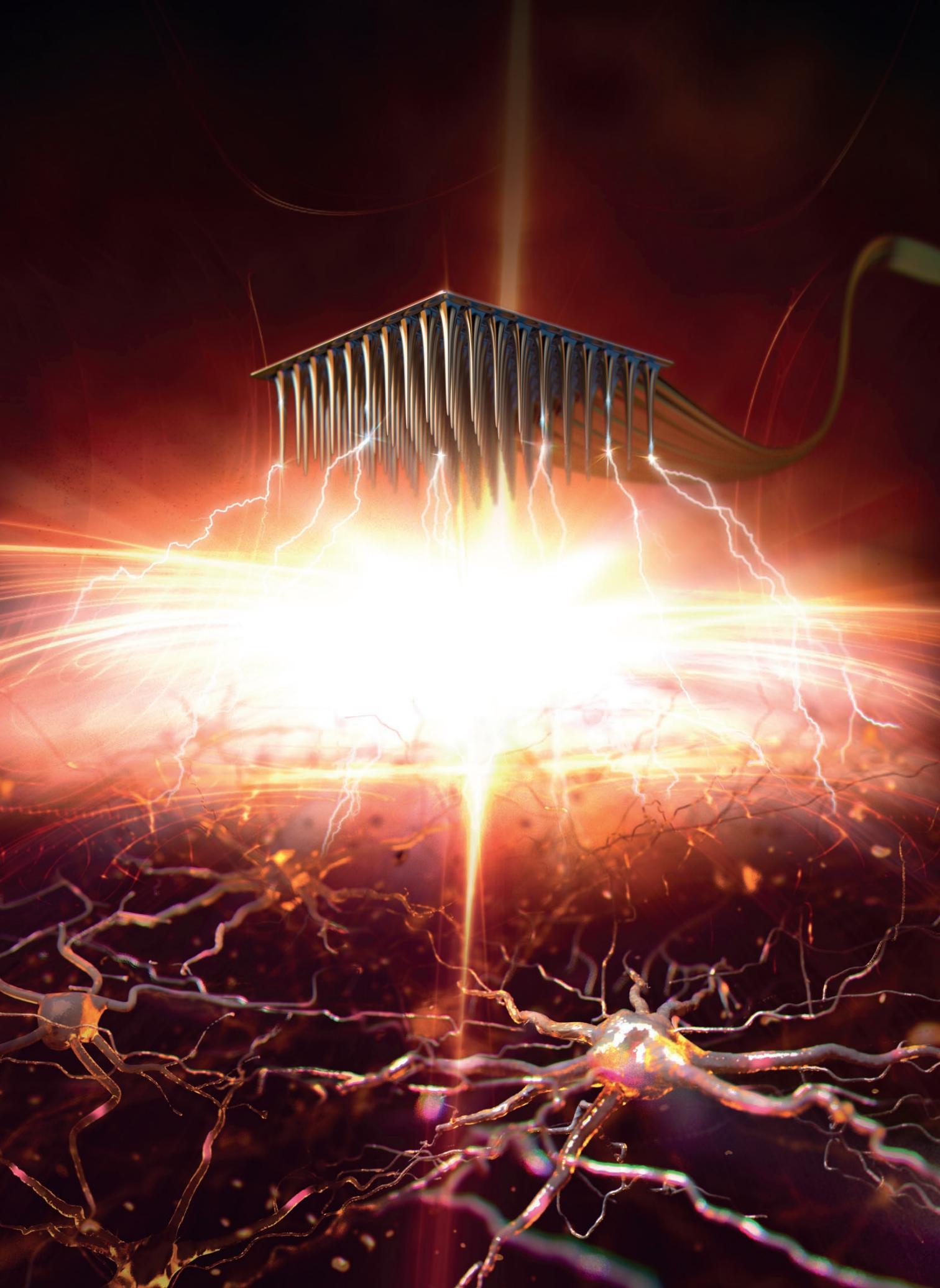
долгое время хранили тайну, которую ученые начинают постигать только сейчас.

Тайны хранит и «второй космос», а именно — Мировой океан. О том, как исследователи учатся понимать «язык океана», читайте в статье «Жизнь моря говорит о себе светом». Академик И.И. Гительзон рассказывает об использовании физических методов для слежения за проявлениями жизни больших природных экосистем, вплоть до Мирового океана.

Великой загадке происхождения жизни на Земле посвящена статья «Жизнь — неизбежное явление». В своем интервью академик М.А. Федонкин говорит о том, как формировалась жизнь на нашей планете, почему древние организмы непохожи на современные и почему жизнь неизбежна.

И, наконец, о тайнах наномира. «Мир молекулярных машин» — так озаглавлено интервью с нобелевским лауреатом по химии Жан-Пьером Соважем, которому на последнем общем собрании Российской академии наук был вручен диплом иностранного члена РАН. Ученый рассказывает о том, какие возможности открываются перед человеком в связи с его исследованиями. ■

**Редакция журнала «В мире науки /
Scientific American»**



НЕЙРОТЕХНОЛОГИИ

МАШИНА ЖЕЛАНИИ

Нейрокомпьютерный интерфейс нового поколения
понимает, чего хочет человек

Ричард Андерсен

ОБ АВТОРЕ

Ричард Андерсен (Richard Andersen) — профессор нейробиологии, руководитель Центра нейрокомпьютерного интерфейса Тяньцзяо и Крисси Чэнь в Калифорнийском технологическом институте. Он изучает нейронные механизмы зрения, слуха, равновесия, осязания и движения, а также создание нейронных протезов. Андерсен — член Национальной академии наук и Национальной академии медицины.



У меня мурашки бегут по коже каждый раз, когда я это вижу. Парализованный доброволец сидит в инвалидной коляске и управляет компьютером или роботизированной рукой с помощью мысли — так выглядит нейрокомпьютерный интерфейс (НКИ), также известный как интерфейс «мозг — компьютер», в действии. Эрик Сорто, получивший огнестрельное ранение в возрасте 21 года, более десяти лет назад, в 2013 г. в моей лаборатории впервые за все это время смог без посторонней помощи выпить пива и использовал для этого лишь силу мысли. НКИ передал нервный сигнал от высокоуровневого участка коры. Электромеханическое приспособление дотянулось до бутылки, схватило ее и поднесло к губам Сорто перед тем, как он сделал глоток. Он пил спустя год после операции по вживлению в мозг электродов, позволяющих сигналам от мыслей запускать движение. Мы с коллегами по лаборатории с удивлением наблюдали, как он выполнял эту кажущуюся простой, но на самом деле весьма сложную задачу.

При наблюдении за этим достижением сразу же возникает вопрос, как простые мысли могут управлять механическим протезом. Мы ежедневно, не задумываясь, двигаем нашими конечностями, и простое выполнение таких действий — задача любого современного НКИ. Однако нейробиологи десятилетиями пытались расшифровать нейронные сигналы, запускающие движения, которые позволяют дотянуться и схватить объект. Скудность успехов в прочтении таких сигналов побудила искать новые способы подключиться к этой какофонии, создаваемой электрической активностью 86 млрд общающихся между собой нейронов. НКИ нового поколения создают прямую связь между мозгом

и протезом, точно подключаясь к тем областям мозга, где формулируется действие — взять чашку или сделать шаг.

От мозга к роботу

Интерфейс «мозг — компьютер» работает путем отправки и получения — «записывания» и «считывания» сообщений к мозгу и от него. Существует два основных класса нейрокомпьютерных интерфейсов. «Записывающие» НКИ обычно используют электрическую стимуляцию для передачи сигнала к нервной ткани. Для этой технологии уже есть успешное клиническое использование. Кохлеарный имплантат стимулирует слуховой нерв, позволяя глухим слышать. С помощью глубокой стимуляции

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Нейрокомпьютерные интерфейсы (НКИ) могут взаимодействовать с нейронными цепями, посылая и принимая сообщения.
- Существующие на сегодня интерфейсы «мозг — компьютер», как правило, работают медленно и неточно.
- В новых исследованиях интерфейс помещают в те области мозга, которые отвечают за намерение сделать движение; такая технология лучше подходит людям с повреждениями спинного мозга.

базальных ганглиев — области, контролирующей двигательную активность, — лечат такие двигательные нарушения, как болезнь Паркинсона и эссенциальный тремор. Сейчас проходят клинические испытания устройства, стимулирующие сетчатку для облегчения некоторых форм слепоты.

В то же время «считывающие» НКИ, которые регистрируют нейронную активность, пока еще только на стадии разработки. Прежде чем эта технология следующего поколения попадет к пациентам, необходимо решить нетривиальные проблемы, связанные с чтением нервных сигналов. Грубые способы считывания уже существуют. Электроэнцефалография (ЭЭГ) позволяет регистрировать усредненную активность миллионов нейронов, содержащихся в нескольких сантиметрах мозговой ткани, но не показывает сигнал одного нейрона в отдельной цепи. Функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) — косвенный способ оценки нейронной активности, она показывает увеличение кровотока в активной области. Она может отображать области меньшего размера, чем видны по ЭЭГ, но ее разрешение все же слишком низкое. Изменения кровотока медленные, поэтому фМРТ не позволяет различать быстрые изменения в активности мозга.

Для того чтобы преодолеть эти ограничения, в идеале хотелось бы регистрировать активность отдельных нейронов. Наблюдение за изменениями частот разрядов большого числа одиночных нейронов дало бы наиболее полную картину происходящего в определенной области мозга. В последние годы стало возможно выполнять такую регистрацию с помощью множества тонких электродов, имплантированных в мозг. Сейчас используются пластины 4×4 мм со 100 электродами. Каждый электрод выступает из пластины на 1–1,5 мм. Такое устройство, напоминающее утыканную гвоздями кровать, способно регистрировать активность от 100 до 200 нейронов.

Сигналы, записанные с помощью этих электродов, поступают в «декодеры», которые с помощью математических алгоритмов переводят различную частоту разрядов отдельных нейронов в сигнал, запускающий определенное движение, например управление роботизированной рукой или компьютером. Такие считывающие НКИ помогут пациентам с неизлечимыми



Интерфейс, разработанный группой под руководством Ричарда Андерсена из Калифорнийского технологического института (слева), позволил Эрику Сорто (справа) управлять роботизированной рукой

повреждениями мозга при поражении спинного мозга, инсульте, рассеянном склерозе, боковом амиотрофическом склерозе и мышечной дистрофии Дюшенна.

Наша лаборатория работает с тетраплегическими пациентами, которые из-за повреждения спинного мозга неспособны пошевелить ни руками, ни ногами. Мы регистрируем сигналы в коре — слое толщиной примерно 3 мм, покрывающем большие полушария мозга. Площадь коры каждого из полушарий в развернутом виде составляет около 80 тыс. мм². По мере появления новых данных выделяют все больше число функциональных областей коры; сейчас их насчитывается более 180. Они обрабатывают сенсорную информацию, взаимодействуют с другими зонами мозга, участвующими в мышлении и принятии решений, или посылают команды, чтобы запустить действие.

Короче говоря, интерфейс «мозг — компьютер» может взаимодействовать со многими областями коры, в том числе

с первичными полями коры, которые реагируют на сенсорные сигналы, например на наклон линий в зрительном поле и интенсивность света, попадающего на сетчатку, или на возбуждение, приходящее от периферического нервного окончания. Кроме того, взаимодействие может быть и с ассоциативными областями, тесно связанными с первичной корой и отвечающими за речь, распознавание объектов, эмоции и контроль над выполнением принятых решений.

Несколько групп ученых стали регистрировать у парализованных пациентов сигналы отдельных нейронов, позволяющие управлять протезом в контролируемых лабораторных условиях. Однако перед тем как начать обеспечивать пациентов нейронными протезами так же легко, как кардиостимуляторами, надо решить основные проблемы. В то время как другие лаборатории работают с моторной корой, моя группа сосредоточилась на регистрации сигналов в ассоциативных областях. Таким образом мы надеемся быстро и универсально фиксировать нейронные сигналы, отражающие намерения пациента.

Моя лаборатория изучала конкретную ассоциативную область — заднюю теменную кору (ЗТК), где начинает планироваться будущее движение. Работая с обезьянами, мы обнаружили в ЗТК участок, где фиксируется намерение начать движение глаз, он называется «латеральная внутритеменная кора». Информацию о движении конечностей обрабатывает другой участок в ЗТК. В теменной коре есть также область, куда поступает сигнал, когда планируется совершить движение руками. Кроме того, Хидео Саката (Hideo Sakata) из Медицинской школы Университета «Нихон» обнаружил, что с планированием хватательных движений связана и передняя внутритеменная область.

Использование ЗТК для управления протезом или курсором компьютера имеет несколько возможных преимуществ. В отличие от моторной коры, с которой работают другие лаборатории и где каждое из полушарий отвечает за конечность с противоположной стороны тела, ЗТК контролирует сразу обе руки. Кроме того, ЗТК определяет цель действия. Например, когда обезьяна видит предмет, до которого хочет дотянуться, эта область мозга немедленно включается, фиксируя местоположение желаемого объекта. В свою очередь, моторная кора посылает сигнал о том, какой должна быть

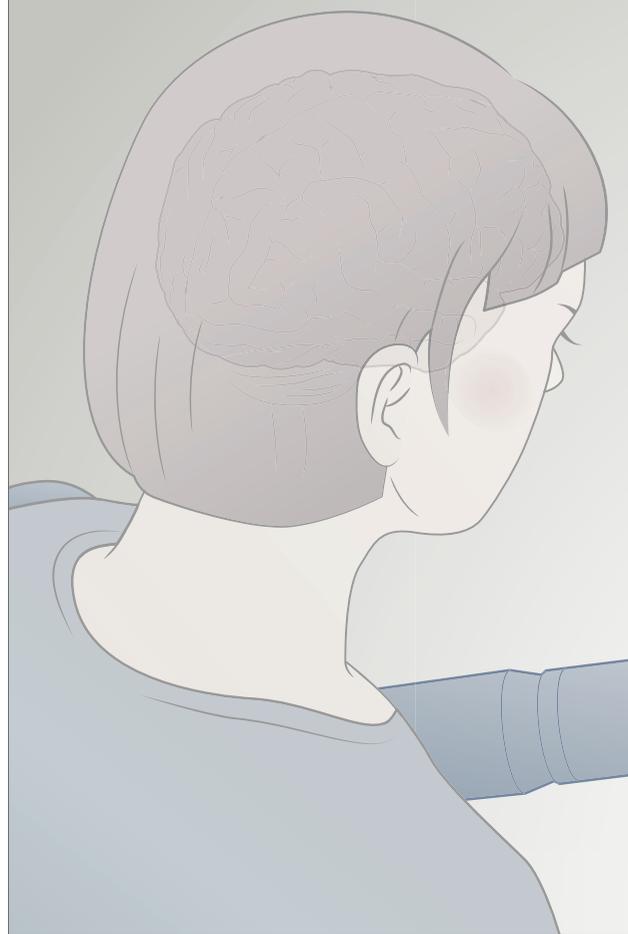
Illustration by AXS Biomedical Animation Studio

Силой мысли

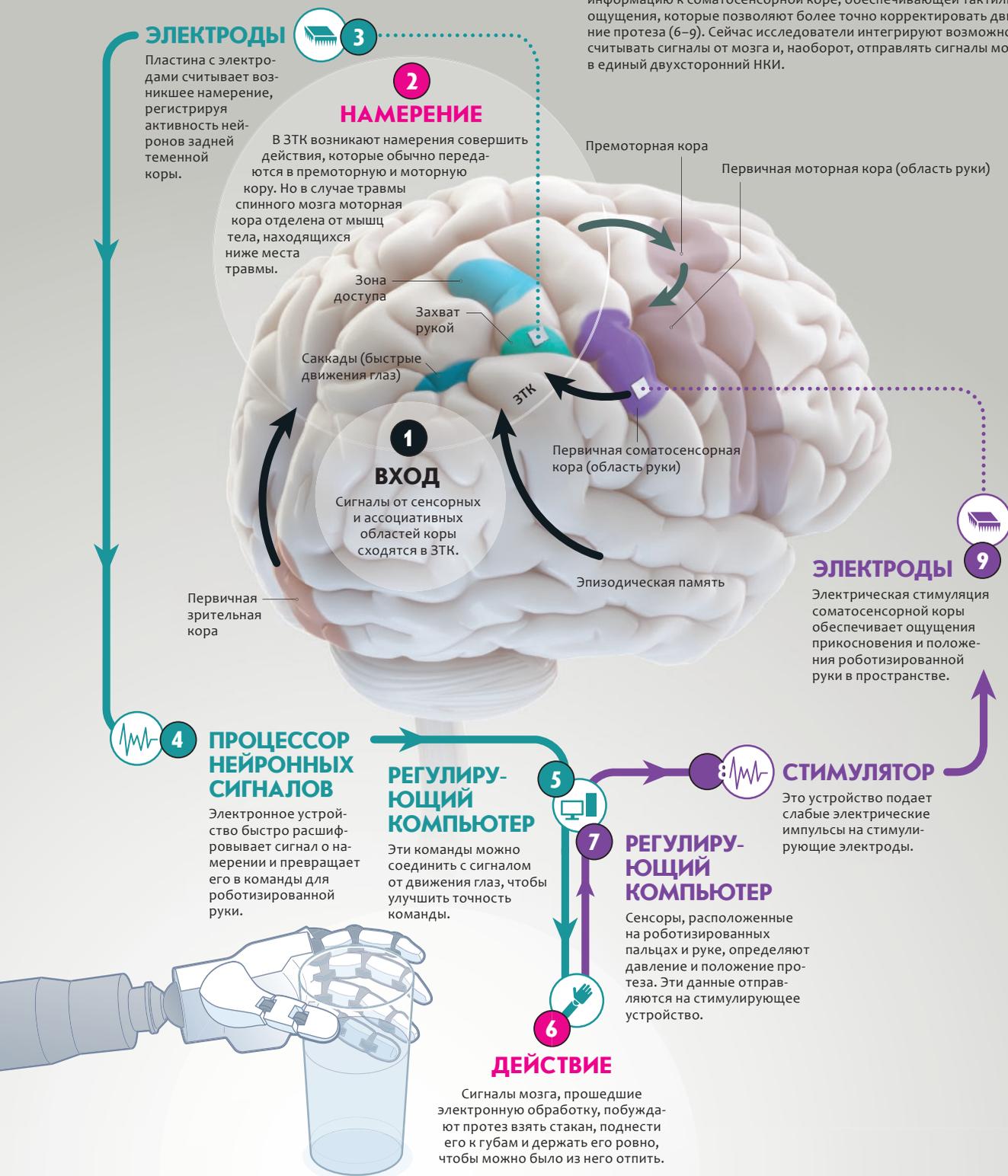
За 15 лет нейробиологи создали нейрокомпьютерные интерфейсы (НКИ), которые позволяют управлять курсором или протезом с помощью сигналов от нервных клеток. Эта технология развивалась медленно, потому что превращение электрической активности нейронов в команду для участия в видеоигре или движения роботизированной рукой — довольно сложный процесс.

Группа ученых из Калифорнийского технологического института попыталась расширить возможности нейропротезирования, подключившись к высокоуровневым нейронным процессам, обеспечивающим намерение совершить действие. Затем соответствующие электрические сигналы передаются на роботизированную руку. В отличие от других лабораторий, где принято использовать для управления протезом сигналы из моторной коры, исследователи из Калтеха поместили электроды в заднюю теменную кору (ЗТК), и на протез передается само намерение действовать.

Для нейробиологов расшифровка нейронных сигналов все еще представляет определенные трудности. Однако использование НКИ, который получает сигнал от верхних уровней мысленной команды, по-видимому, позволяет более быстро и точно контролировать протез.



Лаборатория Ричарда Андерсена в Калифорнийском технологическом институте запустила разработку НКИ, считывающего сигналы мозга о намерении к действию и передающего их на роботизированную руку, которая может захватить стакан и дать попить из него человеку с параличом всех четырех конечностей (1–6). Такой НКИ передает сигнал о положении конечностей, а также осязательную информацию к соматосенсорной коре, обеспечивающей тактильные ощущения, которые позволяют более точно корректировать движение протеза (6–9). Сейчас исследователи интегрируют возможности считывать сигналы от мозга и, наоборот, отправлять сигналы мозгу в единый двухсторонний НКИ.



траектория движения, чтобы дотянуться до предмета. Если известна цель, то НКИ быстро расшифровывает, какое должно быть действие, тогда как на анализ сигнала от моторной коры, содержащего информацию о траектории движения, может потребоваться больше секунды.

Из лаборатории к пациенту

Непросто было перейти от экспериментов на лабораторных животных к изучению ЗТК у человека. Прошло 14 лет, прежде чем мы сделали первый имплантат человеку. Сначала мы вживили здоровым обезьянам точно такие же электроды, как те, которые мы планировали использовать для людей. Затем обезьяны учились управлять курсором на мониторе или роботизированной конечностью.

Имплантация нескольких крошечных пластинок с электродами позволила нам расшифровать большую часть того, что намеревается сделать человек

Мы собрали команду ученых, врачей и реабилитологов из Калифорнийского технологического института, Университета Южной Калифорнии, Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, Национального реабилитационного центра «Ранчо Лос Амигос», больницы и медицинских центров «Каса Колина». Было получено разрешение от Управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA) США и от экспертных советов, которые оценивают безопасность и этичность процедур в лабораториях, больницах и реабилитационных центрах.

Доброволец в проектах подобного типа — настоящий первопроходец, неизвестно, получит ли он от этого пользу или нет. Фактически люди участвуют в эксперименте, чтобы помочь будущим пользователям, которые захотят приобрести эту технологию после того, как ее усовершенствуют для повседневного использования. В апреле 2013 г. нейрохирурги Чарлз Лю (Charles Liu) и Брайан Ли (Brian Lee) провели операцию, имплантировав устройство нашему первому добровольцу Сорто. Процедура

прошла безупречно, но затем, прежде чем протестировать устройство, нам надо было дождаться заживления.

Мои коллеги из Лаборатории реактивного движения NASA, построившие и запустившие марсоходы, рассказывали о семи минутах ужаса, когда марсоход входит в атмосферу планеты и садится. У меня такими были две недели тревоги и гадания, будет ли работать имплантат. Мы знали, как функционируют соответствующие участки мозга у обезьян, но имплантируя электроды человеку, мы ступали на неизведанную территорию. Раньше никто никогда не пытался так регистрировать активность популяции нейронов в ЗТК.

В первый день тестирования мы засекли нейронную активность, а к концу недели сигналы шли уже от достаточного количества нейронов, чтобы начать выяснять, сможет ли Сорто управлять роботизированной рукой. Некоторые нейроны изменяли свою активность, когда Сорто представлял себе, как вращает рукой. Его первой задачей было поворачивать роботизированную конечность в разные положения так, чтобы пожать руку аспиранту. Он волновался так же, как и мы, поскольку с момента получения травмы он впервые взаимодействовал с миром через движение механической руки.

Люди часто спрашивают, сколько времени нужно, чтобы научиться пользоваться интерфейсом «мозг — компьютер». На самом деле специального обучения не требуется. Контроль роботизированной руки с помощью мозговых сигналов о намерениях — процесс простой и естественный. Представляя себе различные действия, Сорто мог наблюдать сигналы отдельных нейронов своей коры, включая и выключая их по своему желанию.

В начале исследования мы спрашивали участников, чего бы они хотели достичь, контролируя движения робота. Сорто хотел получить возможность самостоятельно пить пиво, не прося никого о помощи. Он смог освоить этот навык примерно за год. Вместе с возглавляемой ученым Спенсером Келлисом (Spencer Kellis) из Калтеха командой, куда входили робототехники из Лаборатории прикладной физики Университета Джонса Хопкинса, мы объединили сигналы о намерениях Сорто с технологиями машинного зрения и интеллектуальной робототехники.

Алгоритм машинного зрения анализирует информацию от видеокамер, а интеллект

туальная робототехника совмещает сигнал о намерении с компьютерными алгоритмами, чтобы начать движение роботизированной рукой. Когда Сорто за год освоил эту задачу, все присутствующие разразились аплодисментами и радостными криками. В 2015 г. мы опубликовали в *Science* наши первые результаты использования сигналов о намерениях из ЗТК для управления нейронными протезами.

Сорто — не единственный пользователь нашей технологии. Нэнси Смит участвует в исследовании уже четвертый год, она получила тетраплегию в результате автомобильной аварии около десяти лет назад. Смит была преподавателем компьютерной графики в старших классах и любила играть на пианино. В наших исследованиях вместе с ведущими участниками группы Тайсоном Афлало (Tyson Aflalo) из Калтеха и Надером Пуратяном (Nader Pouratian) из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, в ЗТК у Смит мы нашли детальное представительство каждого пальца обеих рук. Используя виртуальную реальность, она смогла представить каждый из десяти пальцев и перемещать влево и вправо виртуальные руки, изображенные на компьютерном экране. Используя воображаемые движения пяти пальцев одной руки, Смит может сыграть простые мелодии на виртуальной клавиатуре.

Как в мозге представлены цели

Мы были в восторге от работы с этими пациентами, поскольку нам удалось обнаружить нейроны, обрабатывающие сигналы, связанные с намерениями. Всего с нескольких сотен нейронов можно было получить ошеломляющий объем информации. Мы смогли расшифровать большое количество когнитивной активности, в том числе изображение движения без попытки его совершить, движения пальцев, решение вспомнить зрительные стимулы, позиции руки для захвата, наблюдаемые действия, глаголы вроде «схватить» или «толкнуть» и математические вычисления. К нашему удивлению, имплантация нескольких крошечных пластинок с электродами позволила нам расшифровать большую часть того, что намеревается сделать человек.

Вопрос, сколько информации можно получить от маленького участка мозговой ткани, напомнил мне схожую научную проблему, с которой я столкнулся в начале своей карьеры. После защиты

диссертации я работал у покойного Вернона Маунткасла (Vernon Mountcastle) в Школе медицины Университета Джонса Хопкинса, мы смотрели, как зрительное пространство представлено в ЗТК у обезьян. Наши глаза — как камеры, а фоточувствительная сетчатка определяет расположение зрительного стимула и передает эту информацию: формируется ретинопическая карта. Нейроны реагируют на сигнал от небольшого участка сетчатки — так называемого рецептивного поля нейрона. Однако зрительное восприятие отличается от видеозаписи. Когда видеочасть перемещается, записываемое изображение также смещается, но когда мы двигаем глазами, мир кажется неизменным. Ретинопическое изображение, поступающее от глаз, должно преобразовываться в визуальное представление пространства, где учитывается, куда смотрят глаза, чтобы, если они начнут двигаться, мир оставался на месте.

ЗТК — основной центр обработки информации для формирования высокоуровневого представления о пространстве. Чтобы дотянуться до объекта и схватить его, мозг должен учитывать, куда смотрят глаза. При повреждении ЗТК люди не могут точно дотянуться до объекта. В лаборатории Маунткасла мы выявили в ЗТК отдельные нейроны, у которых рецептивным полем была часть поля зрения. Те же клетки несут информацию о положении глаз. Эти два сигнала взаимодействуют, так что зрительный сигнал усиливается сигналом от положения глаз; получается то, что называют полем модулирующих воздействий.

Я продолжал заниматься проблемой представления пространства мозгом, когда впервые получил преподавательскую должность в Институте биологических исследований Солка, прямо через дорогу от Калифорнийского университета в Сан-Диего. Я работал с Дэвидом Зипсером (David Zipser), нейробиологом-теоретиком, разрабатывающим нейронные сети в этом университете, и мы написали в *Nature* о вычислительной модели нейронной сети, которая объединяла информацию о положении на сетчатке и о направлении взгляда для создания карты пространства, не меняющейся при движении глаз. Во время обучения нейронных сетей их средние слои формировали поле модулирующих воздействий, так же как ЗТК в экспериментах. Если передавать

сигналы от зрительных входов и о положении глаз на одни и те же нейроны, то достаточно девяти нейронов, чтобы представить все зрительное поле.

Недавно эта идея о смешанном представителе стимулов, то есть о существовании популяций нейронов, реагирующих на несколько переменных, вновь привлекла внимание ученых. Например, при регистрации нейронов в префронтальной коре наблюдается перекрывание информации от двух типов воспоминаний и различных зрительных объектов.

Кроме того, данная работа помогает объяснить, что происходит в ЗТК. Мы обнаружили это, когда с помощью набора письменных инструкций попросили Смит выполнить восемь различных пар заданий. В одном случае требовалось разработать стратегию, чтобы вообразить или осуществить действие, в другом надо было использовать правую и левую стороны тела, в третьем — сжать руку или пожать плечами. Мы обнаружили, что нейроны в ЗТК объединяют все переменные и при этом наблюдается специфическая активность, отличающаяся от случайных взаимодействий, которые мы и другие исследователи наблюдали в экспериментах на лабораторных животных.

Популяции нейронов, активных при формировании стратегии и при управлении каждой из сторон тела, перекрываются. Если нейрон работает, чтобы инициировать движение левой руки, скорее всего, он отреагирует и на попытку движения правой, однако группы нейронов, контролирующие плечи и ладони, разделены между собой сильнее. Мы назвали это частично перекрывающейся специализацией (*partially mixed selectivity*). Затем мы обнаружили похожую картину для слов, обозначающих движения. Активность клеток, связанных со схожими действиями, может перекрываться. Нейрон, реагирующий на видео, где человек хватается объект, вероятно, будет активироваться и в том случае, когда человек читает слово «хватать». Но клетки, реагирующие на такое действие, как нажатие, скорее всего, будут относиться к другой группе. Как правило, частично перекрывающееся кодирование имеет место там, где требуются схожие вычисления (движения левой рукой такие же, как движения правой). При этом разделяются те действия, где нейронная обработка различается (движения плеча отличаются от движений кисти).

Перекрывающееся и частично перекрывающееся кодирование было обнаружено в некоторых участках ассоциативной коры, и в последующих исследованиях предстоит выяснить, встречается ли оно в других участках, отвечающих за речь, распознавание объектов и исполнительный контроль. Кроме того, хотелось бы знать, используют ли первичные сенсорные или моторные зоны аналогичную частично перекрывающуюся структуру.

Другая ближайшая цель — выяснить, насколько обучение добровольцев новым задачам может повлиять на эффективность использования протеза. Если обучение происходит легко, то в любую область мозга можно внедрить имплантат и обучить любой возможной задаче. Имплантат в первичной зрительной коре можно будет научить выполнению задач, не связанных со зрением. Но если обучение более ограничено, то с имплантатом, например, в моторной области можно обучиться только двигательным задачам. Пока известно лишь, что имплантат можно помещать в области, про которые было показано, что они контролируют конкретную когнитивную деятельность.

Ощущения при письме

Нейрокомпьютерный интерфейс должен не только получать и обрабатывать сигналы от мозга, но и посылать обратную связь от протеза в мозг. Когда мы тянемся, чтобы взять предмет, визуальная обратная связь помогает направить руку к цели. Положение руки зависит от формы предмета, который надо схватить. Если рука, начав манипулировать предметом, не получает сигналов о положении и о касании, качество выполнения быстро ухудшается.

Для наших добровольцев с повреждениями спинного мозга, не способных пошевелиться, очень важно найти способ исправить отсутствие такой чувствительности. Кроме того, они не воспринимают тактильные ощущения и положение тела в пространстве, а это необходимо для плавных движений. Таким образом, идеальный нейронный протез должен компенсировать отсутствие сигналов в обоих направлениях: он должен передавать намерение добровольца и воспринимать информацию о прикосновении и позе, поступающую от датчиков роботизированной конечности.

Роберт Гонт (Robert Gaunt) с коллегами из Питтбургского университета решили

эту проблему, имплантировав пациенту с тетраплегией наборы микроэлектродов в соматосенсорную кору, туда, где обрабатываются сигналы от прикосновения к конечностям. Сотрудники Гонга подавали слабый электрический ток на микроэлектроды, и пациент сообщал об ощущениях от разных участков поверхности руки.

Мы тоже использовали такие имплантаты в участке соматосенсорной коры, отвечающем за руку. И были приятно удивлены, когда один наш пациент сообщил о наличии естественных ощущений, таких как сжатие, постукивание и вибрация на коже, то есть у него появилась кожная чувствительность. Кроме того, он почувствовал движение конечности — это ощущение называется «проприорецепция». Эксперименты показали, что люди, потерявшие чувствительность конечностей, могут восстановить ее с помощью НКИ, который регистрирует восприятие. Следующий шаг — использовать роботизированные руки с сенсорами, чтобы проверить, улучшит ли соматосенсорная обратная связь ловкость контролируемой мозгом руки. Помимо этого, мы хотели бы выяснить, ощутит ли пациент чувство слияния с роботизированной рукой, станет ли она частью его тела.

Другая важная задача — усовершенствование электродов для приема и передачи нервного сигнала. Мы знаем, что имплантат функционирует довольно долго, как минимум на протяжении пяти лет. Однако улучшив электроды, можно было бы сделать эти системы еще более долговечными и увеличить количество регистрируемых нейронов. Другая задача — увеличение длины тончайших электродных шипов, что позволило бы получить доступ к областям, расположенным в складках коры.

Гибкие электроды, которые вместе с мозгом перемещаются при легких толчках во время изменения кровяного давления или при обычном дыхательном цикле, позволяют сделать регистрацию более стабильной. Использующиеся сейчас электроды требуют перекалибровки декодера, поскольку они изо дня в день немного меняют свое положение относительно нейронов, а исследователи хотели бы в итоге следить за активностью одних и тех же нейронов в течение недель и месяцев.

Имплантаты должны быть меньших размеров, работать на слабых токах (чтобы не перегревать мозг) и без проводов, чтобы не требовалось никаких кабелей для

подключения установки к мозгу. Все существующие сейчас НКИ нужно имплантировать с помощью хирургической операции. Но мы надеемся, что однажды будут созданы регистрирующие и стимулирующие интерфейсы, которые смогут принимать и посылать сигналы через череп, а также иметь производительность, не уступающую современным, вживляемым хирургически.

Конечно, НКИ создаются, чтобы помочь парализованным людям. Однако научно-фантастические книги, фильмы и средства массовой информации сосредоточили внимание на возможности использовать технологии для расширения ресурсов, получении «сверхчеловеческих» способностей, которые позволят человеку бежать быстрее и прыгать выше. Но улучшение способностей станет возможным, только когда будут разработаны неинвазивные технологии для точного улавливания активности отдельных нейронов.

И, наконец, я хочу сказать о том удовлетворении, которое получил, проводя фундаментальные исследования и используя их на благо пациентов. Фундаментальная наука необходима для накопления знаний и развития медицины. Исследования получают свою полную реализацию, когда научные открытия используются в клинике. Ученый испытывает чувство глубокого личного удовлетворения, разделяя с пациентом его восторг от возможности двигать роботизированной конечностью, чтобы снова начать взаимодействовать с внешним миром. ■

Перевод: М.С. Багоцкая

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

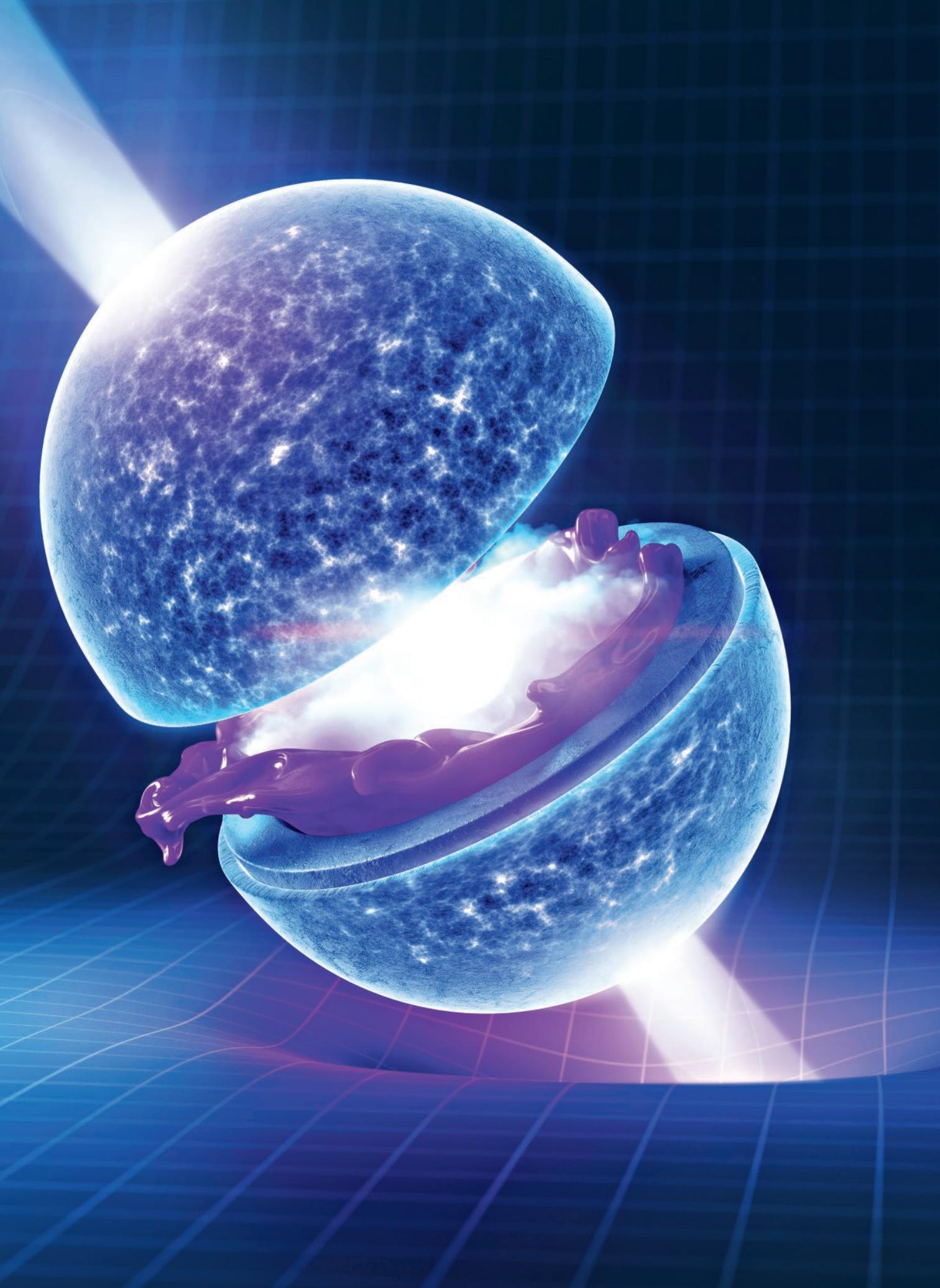
- Оуэн А. Есть тут кто живой? // ВМН, № 7–8, 2014.
- Reach and Grasp by People with Tetraplegia Using a Neurally Controlled Robotic Arm. Leigh R. Hochberg et al. in Nature, Vol. 485, pages 372–375; May 17, 2012.
- High-Performance Neuroprosthetic Control by an Individual with Tetraplegia. Jennifer L. Collinger et al. in Lancet, Vol. 381, pages 557–564; February 16, 2013.
- Decoding Motor Imagery from the Posterior Parietal Cortex of a Tetraplegic Human. Tyson Aflalo et al. in Science, Vol. 348, pages 906–910; May 22, 2015.
- Intracortical Microstimulation of Human Somatosensory Cortex. Sharlene N. Flesher et al. in Science Translational Medicine, Vol. 8, No. 361, Article No. 361ra141; October 19, 2016.
- Proprioceptive and Cutaneous Sensations in Humans Elicited by Intracortical Microstimulation. Michelle Armenta Salas et al. in eLife, Vol. 7, Article No. e32904; April 10, 2018.

ВНУТРЕННЯЯ ЖИЗНЬ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Недра нейтронных звезд — самой плотной формы вещества во Вселенной — долгое время хранили тайну, которую ученые начинают постигать только сейчас

Клара Московиц

Когда гибнет звезда, размеры которой превышают размер Солнца в 20 раз, она превращается, по словам астрофизика Завена Арзуманяна (Zaven Arzoumanian), в «самый возмутительный объект, о котором большинство людей никогда не слышали». Образуется нейтронная звезда — объект размером с город, обладающий невероятной плотностью. Кусочек нейтронной звезды размерами с теннисный мячик весил бы больше 1 млрд т. Внутри нейтронной звезды под воздействием гравитации протоны и электроны сплавляются друг с другом (*нейтронизация вещества*. — *Примеч. пер.*), в результате чего основная масса звезды слагается из нейтронов, откуда и происходит ее название. Таково в основных чертах наше представление о нейтронных звездах. Однако наше понимание процессов в этих объектах далеко до завершения. Астрономы никогда не наблюдали нейтронные звезды вблизи, ни одна лаборатория на Земле не может создать нечто, обладающее сопоставимой плотностью, и поэтому внутренняя структура нейтронных звезд — одна из величайших космических загадок.



ОБ АВТОРЕ

Клара Московиц (Clara Moskowitz) — редактор журнала *Scientific American*, специализируется на вопросах физики и пространства.



Завен Арзуманян, сотрудник Центра космических полетов им. Годдарда NASA, комментирует: «Это устойчивое вещество с самой высокой плотностью, которую только позволяет природа, и находящееся в конфигурации, которую мы не понимаем». Нейтронные звезды представляют собой наиболее сильно гравитирующую форму известного вещества. Чуть прибавить массы — и нейтронная звезда станет уже черной дырой, которая и веществом-то перестает быть, а представляет собой скорее геометрическую структуру пространства-времени. «То, что происходит на этом пороге, — продолжает Арзуманян, — и есть предмет наших исследований».

Существует несколько конкурирующих теорий о том, что происходит на этом пороге. Согласно одним концепциям, нейтронные звезды действительно полны обычных нейтронов и, возможно, содержат небольшое количество протонов. В других же теориях делаются гораздо более экзотические предположения. Возможно, нейтроны внутри нейтронных звезд разваливаются дальше на составляющие их частицы, называемые кварками и глюонами, которые получают свободу распространяться внутри этих звезд. Возможно даже, внутри последних образуются еще более гипотетические объекты, такие как гипероны — нетипичные частицы, состоящие не из обычно встречающихся в атомах верхнего (*up*) и нижнего (*down*) кварков, а из их более тяжелых родственников — странных кварков.

Не распилив нейтронную звезду и не заглянув внутрь, не найти простого способа узнать, какая же из этих теорий верна. Но ученые добились прогресса. Большой прорыв произошел в августе 2017 г., когда в результате наземных экспериментов были обнаружены гравитационные волны — колебания пространства-времени, вызванные ускорением массивных объектов. Источником этих гравитационных волн послужило лобовое столкновение двух нейтронных звезд. Волны несли информацию о массах и размерах этих звезд непосредственно перед столкновением, и ученые использовали ее для установления новых ограничений на свойства и возможный состав всех нейтронных звезд.

Подсказки предоставил и космический эксперимент «Исследователь внутреннего состава нейтронной звезды» (*NICER*), который был начат на МКС в июне 2017 г. *NICER* наблюдал пульсары, представляющие собой быстро вращающиеся излучающие нейтронные звезды с мощными магнитными полями. Когда испущенное пульсаром излучение проходит над Землей, мы видим, как пульсары мигают с частой более 700 раз в секунду. Благодаря этим и другим экспериментам возможность понять, что находится внутри нейтронной звезды, смотрится уже более реалистично. Так, если ученые смогут прояснить этот вопрос, это поможет не только справиться с одним классом «космической странности», но и понять фундаментальные пределы вещества и гравитации.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

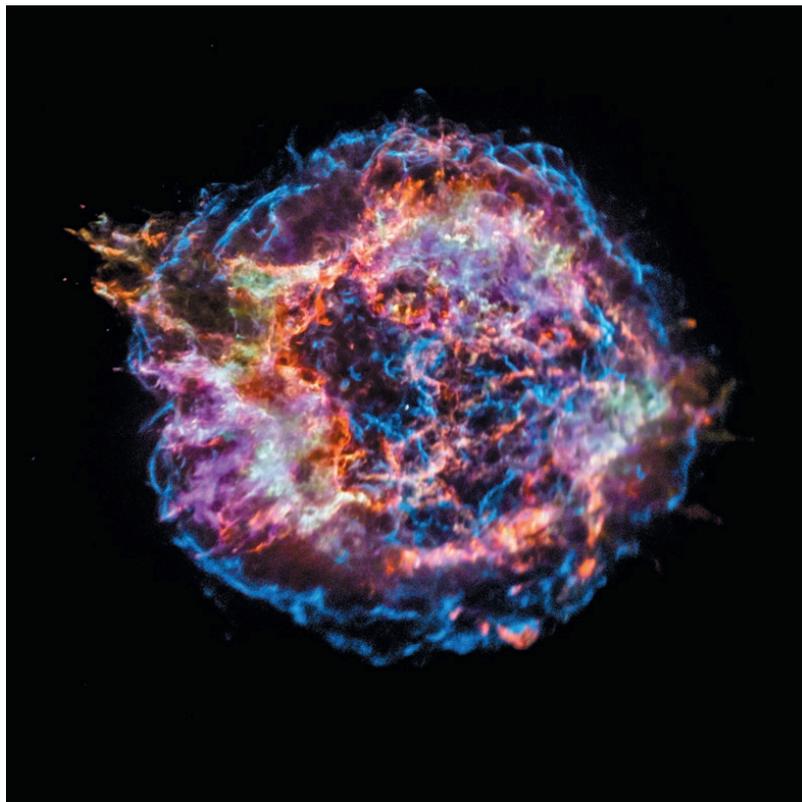
- Нейтронные звезды рождаются, когда звезды в пределах определенного диапазона масс исчерпывают топливо и коллапсируют, оставляя чрезвычайно компактные остатки. Это самая плотная форма материи во Вселенной.
- Ученые знают, что внутри нейтронной звезды гравитация сталкивает протоны и электроны вместе, образуя нейтроны, но они не знают, какие формы принимают эти нейтроны. Соединяются ли они, чтобы создать «сверхтекучую жидкость» без трения, или распадаются дальше на кварки и глюоны, которые их составляют?
- Детекторы, способные измерять гравитационные волны от столкновений нейтронных звезд, и другие новые эксперименты обещают дать представление об этих загадочных объектах.

Сверхтекучие моря

Нейтронные звезды рождаются в катаклизмах, известных как взрывы сверхновых, которые происходят, когда звезды исчерпывают топливо и прекращают генерировать энергию в своих недрах. Внезапно гравитация перестает испытывать сопротивление внутренних сил давления и обрушивается на звезду, подобно поршню, разметав внешние слои звезды и сокрушив ее ядро. Последнее в этот катастрофический момент состоит преимущественно из железа. Гравитация настолько сильна, что буквально раздавливает атомы, впихивая электроны внутрь ядра, до тех пор пока они не сольются с протонами, образовав нейтроны. Физик из Университета Вашингтона в Сент-Луисе Марк Элфорд (Mark Alford) так описывает этот процесс: «Железо сжимается в 100 тыс. раз в каждом направлении. Атом, будучи изначально размером в десятые доли нанометра, становится сгустком нейтронов размером в несколько фемтометров (миллионная часть нанометра, который сам по себе составляет миллиардную часть метра)». Это как если бы Земля сократилась до размера одного городского квартала. Когда звезда завершает сжатие, она содержит около 20 нейтронов на каждый протон. «Это очень похоже на одно гигантское атомное ядро, однако с одним важным отличием, — говорит Джеймс Латтимер (James Lattimer), астроном из Университета Стони-Брук. — Ядро удерживается ядерными взаимодействиями, а нейтронные звезды удерживаются гравитационной силой».

В 1934 г. астрономы Вальтер Бааде (Walter Baade) и Фриц Цвикки (Fritz Zwicky) предложили нейтронные звезды в качестве ответа на вопрос, что может остаться после «сверхновой» — термин, который они использовали в то же время и для сверхъярких взрывов, замечаемых на небе. Тогда минуло всего два года с тех пор, как британский физик Джеймс Чедвик (James Chadwick) открыл нейтрон. Первоначально некоторые ученые скептически относились к тому, что такие экстремальные объекты могут существовать. Эта идея была широко принята, только когда Джоселин Белл Бернелл (Jocelyn Bell Burnell) и ее коллеги наблюдали пульсары в 1967 г. — и исследователи в течение следующего года определили, что они должны быть нейтронными звездами.

Физики считают, что нейтронные звезды могут иметь массу примерно от одной до двух с половиной масс Солнца и что они, вероятно, состоят

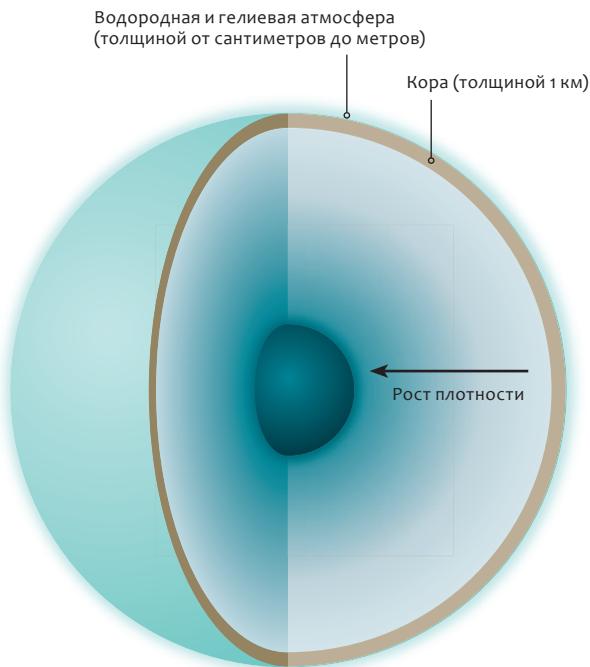


Кассиопея А — остаток древней сверхновой. В ее центре расположена нейтронная звезда, ядро которой может содержать «сверхтекучую жидкость».

по крайней мере из трех слоев. Внешний слой представляет собой газообразную «атмосферу» из водорода и гелия толщиной от нескольких сантиметров до метров. Он плавает над вторым слоем — километровой внешней «корой», состоящей из атомных ядер, расположенных в кристаллической структуре, с электронами и нейтронами между ними. Третий, внутренний слой, который составляет основную часть звезды, представляет собой загадку. Здесь ядра теснятся настолько плотно, насколько позволяют законы ядерной физики, без разделения между ними. По мере продвижения к центру звезды каждое ядро содержит все больше и больше нейтронов. В какой-то момент ядра уже не могут содержать их еще больше — и нейтроны «переливаются через край»: теперь ядер больше нет, а есть только нуклоны (то есть нейтроны или протоны). В конце концов, в самой сердцевине звезды, нуклоны также могут разрушиться. По словам Элфорда, «мы находимся в некоем гипотетическом режиме, когда не знаем, что происходит при этих безумных давлениях и плотностях; мы полагаем, что нейтроны действительно сминаются вместе, и они перекрываются настолько, что вы не можете больше говорить об этом как о жидкости нейтронов, но рассматриваете как жидкость кварков».

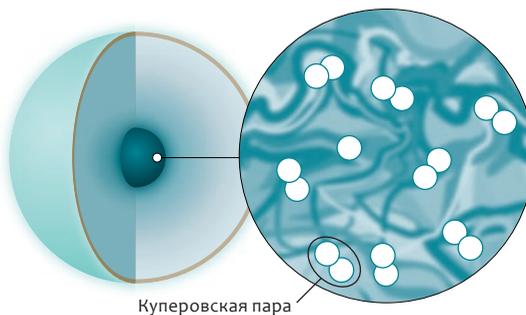
Внутри нейтронной звезды

Нейтронные звезды — загадка. Ученые знают, что над тонким слоем коры, которая состоит из тяжелых атомных ядер и некоторого количества плавающих электронов, у них есть небольшая газовая атмосфера. Но внутри этих внешних слоев лежит ядро — неизвестное вещество, которое, вероятно, в основном состоит из нейтронов. Какую форму принимают эти нейтроны и распадаются ли они на составляющие, кварки и глюоны, внутри самого плотно-го внутреннего ядра звезды — вопрос открытый.



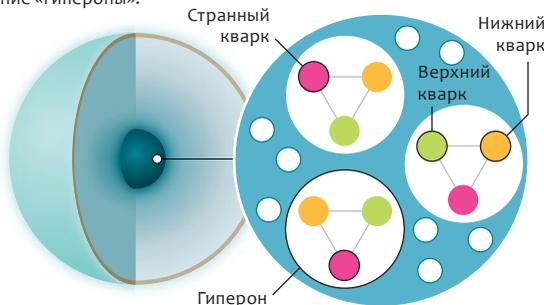
Строение ядра нейтронной звезды (гипотеза I): зародыши сверхтекучей жидкости

Одна из возможностей состоит в том, что частицы внутреннего ядра звезды прижаты друг к другу так тесно, что некоторые из них объединяются, образуя новые частицы, называемые куперовскими парами. Это может случиться с протонами, нейтронами или, если эти частицы уже разрушились, с составляющими их кварками. Новые частицы образуют «сверхтекучую жидкость», которая движется без сопротивления.



Строение ядра нейтронной звезды (гипотеза II): таинственные кварки

Невероятная плотность внутренних областей нейтронной звезды может вынудить кварки преобразовываться из обычных типов (верхнего и нижнего) в экзотические странные кварки. Если такие кварки все еще остаются внутри нейтронов, эти нейтроны получают название «гипероны».



Какую форму принимает эта жидкость — вопрос открытый. Одна из возможностей состоит в том, что кварки образуют «сверхтекучую жидкость», которая не имеет вязкости и, как только она приводится в движение, теоретически никогда не перестанет двигаться. Это странное состояние вещества возможно потому, что кварки чувствуют родство с другими кварками, и если они подходят достаточно близко друг к другу, то могут образовывать связанные состояния, аналог куперовских пар. Сам по себе кварк — это фермион, частица, спин которой имеет квантово-механическое значение в половину целого числа. Когда два кварка объединяются, они действуют уже как единый бозон — частица со спином, равным нулю или какому-то целому числу. После этого изменения частица следует новым правилам. Так, фермионы подчиняются принципу запрета Паули, согласно которому никакие два одинаковых фермиона не могут занимать одно и то же состояние. Бозоны не имеют таких ограничений. Другими словами, будучи фермионами, кварки были вынуждены

тратить более высокие энергии, чтобы «стекаться» друг на друга в переполненных нейтронных звездах. Но став бозонами, кварки получили возможность оставаться в минимально возможном энергетическом состоянии — предпочтительном положении любой частицы — и по-прежнему притискиваться один к другому. При этом кварковые пары образуют сверхтекучую жидкость.

За пределами самой плотной части ядра звезды, где нейтроны, вероятно, не повреждены, нейтроны также могут образовывать пары и приобретают свойства сверхтекучести. На самом деле ученые вполне уверены, что нейтроны проявляют такие свойства в коре нейтронной звезды. Доказательства приходят из наблюдений сбоев вращения пульсаров — ситуаций, при которых вращающаяся нейтронная звезда быстро ускоряется. Теоретики полагают, что эти сбои возникают, когда скорость вращения звезды в целом выходит из синхронизации с вращением сверхтекучего вещества внутри ее коры. Вообще говоря, вращение звезд со временем естественно замедляется,

но сверхтекучее, протекающее без трения, — нет. Когда разница между этими скоростями становится слишком велика, сверхтекучее вещество передает угловой момент коре. По словам Латтимера, «это похоже на землетрясение; вы получаете сбой во вращении и прилив энергии, что ведет к увеличению на короткое время частоты вращения, а затем процесс вращения снова стабилизируется».

В 2011 г. Латтимер и его коллеги предположительно нашли доказательство сверхтекучести в ядре нейтронной звезды. Однако ученый признает, что вопрос все еще открыт для обсуждения. С целью поиска доказательства команда Латтимера, возглавляемая Дэни Пейджем (Dany Page) из Национального автономного университета Мексики, изучила 15-летние рентгеновские наблюдения Кассиопеи А, остатка сверхновой, который впервые стал видимым на Земле в XVII в. Ученые обнаружили, что пульсар в центре туманности охлаждается быстрее, чем предполагает традиционная теория. Одно из объяснений состоит в том, что многие нейтроны внутри звезды образуют пары и становятся сверхтекучими. Пары разрушаются и переформируются, испуская нейтрино, что приводит к потере нейтронной звездой энергии и охлаждению. Как говорит Латтимер: «Это то, что мы никогда не думали увидеть. Но нате вам, все-таки обнаружилась одна звезда подходящего возраста. Однако, как говорится, все проверяется на практике — и доказательство придет еще лет через 50 или около того, когда звезда, по предсказаниям теории, замедлит процесс охлаждения, потому что как только сверхтекучее вещество будет создано, уже не будет нужды терять дополнительную энергию».

Загадочные кварки

Сверхтекучая жидкость — это лишь один из возможных вариантов описания внутренних областей нейтронной звезды. Быть может, нейтронная звезда служит приютом редких «необычных кварков».

Кварки бывают шести видов (ароматов) — верхний (*up*), нижний (*down*), очарованный (*charm*), странный (*strange*), истинный (*truth* или *top*), прелестный (*beauty* или *bottom*). Только два самых легких из них, верхний и нижний, находятся в атомах. Остальные ароматы настолько массивны и нестабильны, что обычно появляются лишь как короткоживущие осколки в процессах столкновения частиц с высокой энергией внутри ускорителей, таких как Большой адронный коллайдер. Но в чрезвычайно плотных недрах нейтронных звезд верхний и нижний кварки внутри нейтронов могут иногда превращаться в странные кварки. (Другие необычные ароматы — очарованный, истинный и прелестный — настолько массивны, что, скорее всего, не сформируются даже там.) Если странные кварки появляются и остаются

связанными с другими кварками, то они образуют нейтроны-мутанты, называемые гиперонами. Возможно также, что эти кварки вообще не содержатся в частицах, — они могут свободно бродить в кварковом супе.

Каждая из этих возможностей должна измеримым образом изменять размер нейтронных звезд. Неповрежденные нейтроны внутри звезды, по словам Арзуманяна, будут действовать, «как марморные шарики, и формировать жесткое, твердое ядро». Твердое ядро, как правило, давит на внешние слои, что ведет к увеличению размера всей звезды. С другой стороны, если бы нейтроны растворились в кварк-глюонном супе, то сформировали бы более «мягкую, легко сдавливаемую» звезду меньших размеров. Один из главных исследователей и научный руководитель эксперимента *NICER* Арзуманян так говорит о целях своего эксперимента: «Одна из ключевых задач *NICER* — произвести измерение массы и радиуса [нейтронных звезд], которое поможет нам выбрать или исключить некоторые теории сверхплотного состояния вещества».

Прибор *NICER* представляет собой коробку размером со стиральную машину. Он установлен снаружи Международной космической станции. *NICER* ведет постоянный мониторинг нескольких десятков пульсаров, распределенных по небу, детектируя испускаемые ими рентгеновские фотоны. Измеряя время прихода и энергию фотонов, а также то, как гравитационные поля звезд искривляют траектории этих фотонов, *NICER* дает возможность вычислять массы и радиусы набора пульсаров и сравнивать их между собой. По словам Элфорда, «если *NICER* обнаруживает звезды с примерно одинаковой массой, но очень разными радиусами, это означает, что происходит что-то странное — присутствует какая-то новая форма материи, которая, появившись, заставляет звезды сжиматься». Такое превращение вещества может произойти, например, когда нейтроны распадаются на кварки и глюоны.

Измерение размеров нейтронных звезд — полезный метод сужения диапазона возможных форм, которые может принимать вещество внутри нейтронных звезд. Ученые когда-то думали, что половина нейтронов в любой нейтронной звезде превратится в гипероны, содержащие странные кварки; теоретические расчеты показали, что такая богатая гиперонами звезда не может превышать массу Солнца в полтора раза. Однако в 2010 г. астрономы во главе с Полом Деморестом (Paul Demorest) из Национальной радиоастрономической обсерватории измерили массу одной нейтронной звезды в 1,97 солнечных масс, исключив ряд теорий о внутренней части нейтронной звезды. По оценкам физиков, гипероны не могут составлять более 10% нейтронной звезды.

Расследования на месте крушения

Изучение отдельных нейтронных звезд может раскрыть нам многое, но мы узнаем гораздо больше, когда исследуем процессы столкновения двух нейтронных звезд друг с другом. В течение многих лет телескопы обнаруживали вспышки света, называемые гамма-всплесками, которые, как подозревали исследователи, происходят от слияния двух нейтронных звезд. В августе 2017 г. были обнаружены гравитационные волны — так астрономы увидели первое подтвержденное слияние нейтронных звезд.

Поговорим об этом событии более подробно: 17 августа 2017 г. два эксперимента — *LIGO* (Лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория, базируется в штатах Вашингтон и Луизиана), и *Virgo* (европейский проект недалеко от Пизы) — одновременно обнаружили гравитационные волны, вызванные тем, что две нейтронные звезды, сближаясь друг с другом по спирали, в конце концов слились в единую нейтронную звезду или черную дыру. Это было не первое обнаружение гравитационных волн, но все предыдущие сигналы порождались столкновениями двух черных дыр. До этой даты ученые никогда не наблюдали гравитационных волн, исходящих от нейтронных звезд, и это был также первый раз, когда телескопы отреагировали на обнаружение гравитационных волн и увидели свет, исходящий из той же самой области на небе и в то же самое время. Электромагнитные и гравитационные волны совместно дали большое количество информации о том, где и как произошел катаклизм, обогативший наши знания физики нейтронных звезд. Вот как сказал Латимер об этом удачно выпавшем на долю астрономов наблюдении: «Я был совершенно ошеломлен. Думал, что это слишком хорошо, чтобы оказаться правдой».

Астрофизики проследили волны от пары нейтронных звезд, находящихся на расстоянии около 130 млн световых лет от Земли. Детали этих волн — их частота, интенсивность и путь, которому они следовали с течением времени, — позволили исследователям оценить, что непосредственно перед слиянием каждая из нейтронных звезд обладала массой примерно в 1,4 солнечных и радиусом порядка 11 или 12 км. Эти знания помогут ученым составить детальное описание физики процессов нейтронных звезд — их уравнение состояния. Последнее дает соотношение для плотности вещества при разных давлениях и температурах и должно быть применимо ко всем нейтронным звездам во Вселенной. Теоретики предложили несколько возможных выражений для уравнения состояния, которые соответствовали бы разным конфигурациям вещества внутри нейтронных звезд. Кроме того, предложили и новые наблюдения, чтобы иметь возможность исключить некоторые

из теоретических моделей. Например, открытие того факта, что радиусы нейтронных звезд относительно малы, стало неожиданностью. Некоторые теории сталкиваются с трудностями, когда пытаются дать единое описание и этих компактных нейтронных звезд, и известных тяжелых звезд, исполнинов с массами в 1,97 солнечных. Все эти звезды невозможно описать одним фундаментальным уравнением состояния. По словам Джоселин Рид (Jocelyn Read), астрофизика Калифорнийского государственного университета в Фуллертоне и соруководителя команды *LIGO* по исследованию экстремальных состояний вещества, «это заставляет наше уравнение состояния прокладывать себе путь через всевозможные наблюдения; попытка создать модели компактных звезд, а также моделей, в которых поддерживается существование массивных звезд, становится сложной задачей для теоретиков, но это действительно интересно — и может стать еще интереснее».

До сих пор в экспериментах *LIGO* и *Virgo* наблюдалось только одно столкновение нейтронных звезд, но скоро может осуществиться еще одно подобное наблюдение. «Я работаю в этой области достаточно долго, — говорит Рид, — и это такая фантастика — продвинуться из эпохи чисто теоретических рассуждений наподобие: "Если мы в принципе можем увидеть гравитационные волны, тогда мы должны быть в состоянии их увидеть". Теперь у нас появился шанс сделать это».

Пределы вещества

Тем временем, пока гравитационно-волновые детекторы улучшают свою чувствительность, выигрыш может быть очень велик.

Например, одна из проверок того, что находится внутри нейтронной звезды, включает поиск гравитационных волн, испускаемых любой закрученной жидкостью в ее середине. Если жидкость имеет очень низкую вязкость или вообще не имеет вязкости, как сверхтекучая жидкость, то она может начать течь по определенным путям, называемым *г*-модами, которые высвобождают гравитационные волны. Как говорит Элфорд, «эти гравитационные волны будут намного слабее, чем от слияния; здесь мы имеем дело с веществом, которое тихо плещется, а не разрывается на части». Элфорд и его сотрудники определили, что запущенный в настоящее время усовершенствованный детектор *LIGO* не сможет регистрировать такие слабые волны. Но их будут способны уловить будущие обновления *LIGO*, а также новые запланированные обсерватории, такие как европейский наземный Телескоп Эйнштейна.

Разрушение нейтронных звезд дало бы нам картину материи в ее едва постижимых крайностях — форму, настолько удаленную от атомов, составляющих наш мир, что она выходит за пределы

возможного. Могли бы воплотиться в реальность воображаемые курьезы, такие как плещущаяся кварковая материя, сверхтекучие нейтроны и ди-ковинные гиперонные звезды. Глубокое понимание физических процессов, идущих в нейтронных звездах, смогло бы дать ученым и нечто большее. Фундаментальная задача — это понимание законов, которые управляют ядерными взаимодействиями: нейтронные звезды смогли бы помочь разобраться в причудливом танце протонов, нейтронов, кварков и глюонов. И, наконец, нейтронные звезды смогли бы привести ученых к разгадке самой большой тайны природы — гравитации.

Нейтронные звезды — это всего лишь один из способов исследования ядерных сил. Работа ведется по всему миру и на ускорителях частиц, которые действуют как микроскопы, чтобы заглянуть внутрь атомных ядер. Когда же проблемы ядерной физики будут решены, ученые смогут переключиться на гравитацию. «Нейтронные звезды — это смесь гравитационной физики и ядерной физики, — говорит Ор Хен (Or Hen), физик из Массачусетского технологического института. — Сейчас мы используем нейтронные звезды как лабораторию для понимания ядерной физики. Но поскольку у нас есть доступ к ядрам здесь, на Земле,

мы должны быть в состоянии достаточно хорошо ограничить ядерный аспект проблемы. Тогда мы сможем использовать нейтронные звезды, чтобы понять гравитацию — одну из самых больших проблем в физике».

Гравитация в ее нынешнем понимании — через общую теорию относительности Эйнштейна — не уживается с теорией квантовой механики. В конечном счете одна из теорий с необходимостью должна сдвинуться с места, и физики не знают, какая именно. «Мы туда доберемся, — уверен Хен, — и это очень интересная перспектива». ■

Перевод: О.С. Сажина

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Финкбайнер Э. Вестники с небес // ВМН, № 7, 2018.
- Rapid Cooling of the Neutron Star in Cassiopeia A Triggered by Neutron Superfluidity in Dense Matter. Dany Page et al. in Physical Review Letters, Vol. 106, Article No. 081101; February 22, 2011.
- GW170817: Measurements of Neutron Star Radii and Equation of State. B.P. Abbott et al. (The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration) in Physical Review Letters, Vol. 121, Article No. 161101; October 15, 2018.

Выходит 6 раз в год

Познавательный журнал для хороших людей

Черные дыры – это результат конечной стадии эволюции массивных звезд, взрывающихся в результате гравитационного коллапса, и тихой «кончины» звезд-супертяжеловесов

Палеогенетик С. Паабо: «Может быть, полные скелетные останки денисовца давно уже где-нибудь найдены, только их пока не опознали»

Полугодовая осада и разгром корякского острога Большой посад – один из самых кровавых эпизодов освоения русскими Камчатки

Уже в неолите на востоке Китая для массового производства изделий из нефрита использовали сверлильно-расточный «станок» с каменным подшипником

«Кому нужны книжки без картинок?» – правоту Алисы полностью подтвердила уникальная выставка дореволюционной детской книги в главной библиотеке страны

www.scfh.ru



РАК НАДО ЗНАТЬ В ЛИЦО

Тема редких опухолей становится все более актуальной: количество новых, ранее не диагностированных видов онкологических заболеваний постоянно растет, некоторые из них наблюдаются впервые. Во всем мире проводятся масштабные исследования, результаты которых докладываются на крупных медицинских конференциях. В нынешнем году в Москве состоялся Первый международный конгресс «Редкие опухоли. Фундаментальные и клинические достижения». Впервые у нас в стране тема диагностики и лечения редких видов онкозаболеваний прозвучала так масштабно.

О том, каковы перспективы развития онкологической науки и практики в России, — наш разговор с генеральным директором ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава РФ, главным онкологом России академиком **Андреем Дмитриевичем Каприным** и заведующим отделом лекарственного лечения ФГБУ «НМИЦ радиологии» доктором медицинских наук **Александром Александровичем Феденко**.



Академик А.Д. Каприн

— Андрей Дмитриевич, чем вызван столь масштабный интерес к теме редких опухолей?

— К редким относятся опухоли, которые встречаются менее чем у шести заболевших на 100 тыс. населения, но с учетом огромного количества онкологических пациентов у нас и за рубежом это очень заметные цифры. В общем объеме наблюдаемых онкобольных это 20–25%. Согласно прогнозу Всемирной организации здравоохранения, количество этих больных будет расти.

— С чем связан этот рост?

— Рост заболеваемости вызван в основном двумя факторами: постарением населения планеты (рак — это в основном удел пожилых людей) и значительными успехами медицины в плане диагностики, способов распознавания заболевания. Сегодня мы знаем, что опухоль зачастую состоит из разных пулов стволовых клеток. Это значит, что к такому больному нужно более пристальное внимание, потому что гетерогенные опухоли не всегда можно лечить по обычной схеме. Это, кстати, еще раз подтверждает один из принципов нового взгляда на медицину — персонафикацию, о которой говорит министр здравоохранения В.И. Скворцова, особенно в онкологии, когда мы должны лечить больного не по общей схеме, а иначе.

Орфанная онкология — это очень важное направление, которое у нас в стране пока еще не очень развито, и одна из целей конгресса — его становление. По некоторым оценкам, в России сейчас насчитывается уже около 185 тыс. больных с редкими опухолями. Решая задачу увеличения продолжительности жизни до 80 лет, которую ставит перед нами президент, мы должны ясно понимать, что при этом увеличится и количество онкологических пациентов, а значит, появится еще больший пул пациентов с редкими опухолями. Поэтому мы должны иметь план действий, четкое понимание, как решать проблемы таких пациентов,

и наш конгресс — первый шаг на пути к созданию единой информационной платформы по редким онкозаболеваниям. Конечно, важны и обмен опытом с иностранными коллегами, которые этим уже активно занимаются, и возможность организационно отработать подходы к созданию такой платформы.

— Диагностика редких опухолей отличается от диагностики обычных, более или менее изученных опухолей?

— Редкая опухоль имеет ряд особенностей. Например, место ее локализации может быть совершенно неожиданным. Однако онкология — это всегда сначала патоморфология. Сейчас уже мало одной световой микроскопии — зачастую нужна молекулярно-генетическая диагностика. Лишь имея такую информацию, развивая и углубляя диагностику опухолевого процесса, мы проникаем в его глубину и создаем паспорт этих клеток. Это очень важно для правильного воздействия на опухоль. Рак — это живая развивающаяся система, поэтому нам надо разрабатывать и новые протоколы лечения.

— Вы не раз говорили о том, что у нас первичное онкологическое звено отстает от желаемого уровня, особенно в регионах, и что информатизация здравоохранения, телемедицина, здесь может стать во многом палочкой-выручалочкой. Как вам видится эта картинка по отношению к редким опухолям?

— Не так давно в Туле состоялся большой семинар для руководителей здравоохранения ЦФО, который проводила лично В.И. Скворцова. Мы слышали потрясающей глубины доклад министра с большим количеством цифр и постановкой проблем, которые нам предстоит решать. Большое внимание было уделено подходам к разработке маршрутизации пациента и работе с первичным звеном. Министр обозначила требования к развитию онконастороженности среди врачей общей практики и узких специалистов-неонкологов, которые ежедневно общаются с населением и должны знать основы поведения с пациентами: обязательный осмотр кожи, анализы у гинекологов и урологов по достижению определенного возраста, маммография и гастроэнтероскопия. Такие исследования зачастую помогают заподозрить онкологическое заболевание на ранних стадиях и отправить человека на дополнительную диагностику к онкологу.

Что касается редких опухолей, то специальные навыки нужно будет прививать и онкологам, которые сидят на рутинной работе, чтобы у них возникла онконастороженность по отношению к орфанным онкозаболеваниям. Это сложная задача, которая требует от нас, как от национальных медицинских исследовательских центров, разработки и внедрения требований и регламента,

необходимых для применения к тому или иному пациенту, чтобы он правильно лечился. Уже есть готовые методические рекомендации, а некоторые еще в работе.

— То есть терапевт, к которому обратился пациент, в не совсем понятной ситуации должен передать его онкологу. А тот должен исключить развитие редкой опухоли и для этого провести необходимые исследования и консультации?

— В том числе — с помощью телемедицинских технологий. С развитием цифрового контура в медицине он сможет не только связаться с нужными специалистами, но и передать по сканеру морфологическую картинку в референсный центр, где будет подтверждено наличие или отсутствие редкой опухоли и будут рекомендованы дополнительные анализы, которые нужно будет доделать на месте, чтобы уточнить диагноз и определиться с лечением. И если это будет редкая опухоль, пациент должен лечиться в большом специализированном онкологическом центре.

— Можно ли сказать, что с каждым годом появляются все новые и новые редкие опухоли?

— Да, это так. Появляются новые, изучаются уже известные. Некоторые за время наблюдения за ними уже стали не очень редкими. Например, нейроэндокринные опухоли. Они очень сложны в диагностике, их не так просто диагностировать даже с помощью позитронно-эмиссионной томографии. Но их все больше и больше, локализации совершенно разные, и сейчас готовятся для них новые маркеры — например, хромогранин А, который мы хотим ввести в список государственных гарантий при лечении по ОМС.

— А есть ли редкие опухоли, которые представляли собой единичный случай в вашей практике?

— Да, недавно мы смотрели очень интересную пациентку со сложной опухолью, аденокарциномой совершенно невероятного расположения на подвздошных сосудах. Она располагается рядом с яичником, но это не опухоль яичника. Это крайне редкий вид злокачественной опухоли, какого раньше мы не наблюдали. И таких случаев нам присылают из регионов достаточно много.

— И здесь тоже крайне важна ранняя диагностика. А еще лучше профилактика.

— Безусловно. Саркомы мягких тканей — тоже очень редкие и сложные для лечения опухоли. Они злокачественно протекают, но при правильном подходе могут попасть под так называемый правильный онкологический контроль — локальный контроль опухоли. Это методика, позволяющая перевести больного в разряд хронических пациентов и держать его на длительном, многолетнем онкологическом контроле.

— Насколько важны контакты с зарубежными онкологами?

— Очень важны. Это прежде всего знакомство с опытом наших зарубежных коллег, которые прошли по этому пути значительное расстояние. Онкология — это вообще дорогая и очень тяжелая дорога. Но если кто-то по ней прошел больше, не надо стесняться взять это на вооружение. Кроме того, нам очень интересно, как они оценят наш опыт и как это состыкуется с их представлениями. Мы стараемся работать по международным стандартам, но в каждой стране есть свои особенности, в том числе и у нас.

— Чувствуете ли вы, что онкология как специальность в последнее время становится более популярной? Пошла ли туда молодежь?

— Безусловно. У нас в стране есть большой авторитет национального лидера, и когда президент говорит, что онкология выделена в отдельную специальность, мы, практики, сразу это чувствуем. Как результат: у нас в прошлом году на 16 бюджетных мест пришли 387 человек устраиваться на работу. Это больше, чем на некоторые факультеты в медицинском вузе. Ребята очень толковые. И это позволяет выбрать из них самых-самых — с двумя языками, с пониманием, желанием.

Более того, мы сейчас идем по пути поддержки молодых специалистов — у нас есть внутренние гранты, чтобы мы потом не потеряли этих ребят.

Но должен сказать, что здесь главное — внимание государства. Сейчас мы переживаем расцвет онкологии, грех упустить эту возможность. Мы должны оправдать доверие, которое нам оказывает страна. Это накладывает большую ответственность, потому что мы никогда не находились под такими пристальными вниманием и контролем, как сейчас. Министр практически каждые две недели проводит селекторные совещания с регионами, посвященные программе борьбы с онкологическими заболеваниями. Мы должны быть готовы представить каждому региону аналитическую справку и оказать конкретную помощь.

— Андрей Дмитриевич, задам сакраментальный вопрос. Как вы думаете, удастся ли когда-нибудь полностью победить рак?

— Сейчас я уверен, что мы должны двигаться в направлении победы. Трудно сказать, когда и как нам это удастся, как те или иные наши прорывные технологии будут этому способствовать, но не верить в победу и жить, просто работая, невозможно. Поэтому нужно делать все для того, чтобы это свершилось. Мне доверена честь возглавлять большой коллектив. Каждый день, чувствуя дыхание этого коллектива, с которым я работаю уже много лет, ощущаю, что у нас все получится.



Надо верить в то, что делаешь, и тогда все обязательно получится



Доктор медицинских наук А.А. Феденко

Александр Александрович Феденко, заведующий отделом лекарственного лечения ФГБУ «НМИЦ радиологии»:

— Александр Александрович, чем, помимо частоты заболеваемости, редкие опухоли отличаются от всех остальных?

— Врачи говорят: все, что встречается часто, — это просто, а все, что редко, — сложно. Редкие опухоли, которые еще называют орфанными, очень сложны в диагностике и лечении. А путь от момента окончания медицинского вуза до уровня эксперта умножается как минимум вдвое. Поэтому редкими опухолями мало кто занимался.

Онкология — проблема глобальная, но во многом она сходна как для России, так и для Европейского союза или Соединенных Штатов Америки. Во многих странах онкопрограммы поддерживаются государством, поскольку собственными силами медицинское сообщество выполнить все те задачи, которые сейчас ставятся, не в состоянии. Но многое зависит и от нас. Например, консолидация, выработка единых подходов. Этим в первую очередь мы и занялись. Дальше идут воспитание кадров, на которое нужны средства, и различные клинические исследования. Без государственной поддержки это физически невозможно. Я очень надеюсь, что власти нас слышат и проблема редких опухолей станет частью общей онкологической программы.

— Есть ли какая-то специфика в таких редких опухолях для разных стран, где одна патология встречается чаще, чем другая?

— Да, конечно, и на этот счет есть определенные статистические данные. Это зависит и от принадлежности к определенной этнической группе, и от инсоляции, и от экологии и уровня радиационного излучения в данной местности. Мы помним последствия аварии на Чернобыльской АЭС, и это — одно из мест проявления редких болезней. Это гемобластозы, саркомы, которые индуцированы лучевым воздействием. Мы до сих пор пожинаем плоды тех лет.

— Какая конкретно работа ведется в этом направлении?

— В нашей стране мы пытаемся выстроить единую платформу из уже имеющихся центров, которые работают в области редких онкозаболеваний. Могу сказать, что два из наиболее развитых на сегодня направлений — это онкоортопедия (саркомы) и нейроонкология. Это два сообщества, которые действуют активно: сотрудничают с научными центрами, ведут исследовательские и клинические программы, помогают более четко и детально разобраться с клиникой конкретных заболеваний. За последние десятилетия мы видим

в этом успех. То есть больные в специализированном центре статистически достоверно живут дольше, нежели в тех случаях, когда они получают помощь в онкологическом учреждении «общего профиля» по месту жительства.

— Вы занимаете должность заведующего отделом лекарственного лечения в НМИЦ радиологии. Как сейчас выглядит лекарственное лечение онкологических пациентов в нашей стране? Это по-прежнему проблема?

— Лекарственное лечение во всем мире в 90% случаев проводится амбулаторно. Пациенты приходят в клинику, получают терапию, а сами живут дома и принимают те или иные препараты. В основном это таблетированные препараты — самый простой и доступный метод. Но, к сожалению, не все болезни ими лечатся, некоторым больным необходимо проводить инфузии. На эти процедуры пациенты приходят в дневные стационары. За последние полгода дневной стационар в МНИОИ им. П.А. Герцена стал принимать до 400 пациентов в месяц. Это достаточно большие показатели. Надеюсь, в ближайшие полгода мы удвоим это количество и будем пытаться максимально перевести больных со стационарного лечения на амбулаторное. Это одно направление. Второе направление нашей деятельности — клинические исследования и изучение новых лекарственных препаратов.

— Они импортные? Или у нас появляются свои?

— Отраднo, что появляются свои. На сегодня в НМИЦ радиологии планируется к старту несколько клинических исследований, которые инициированы отечественными производителями. Это достаточно современные препараты. При этом, конечно, есть и западные образцы. Мы стараемся соблюдать золотое правило: прежде чем назначать новый препарат, который стоит немалых средств, важно понять, повлияет ли он на отдаленный онкологический результат. Иначе говоря, будет ли больной на этом препарате жить дольше и качественнее, если мы будем использовать это средство, или проще оставить стандарт. Это очень важно.

— Расскажите подробнее о наших отечественных разработках. Что готовится, планируется, какие есть ожидания?

— Отечественная фарминдустрия сейчас достаточно бодро встает на ноги. Из инновационных препаратов один уже в этом году будет зарегистрирован, и появится возможность применять его на российской популяции. Следующий этап — выход на международный рынок с нашим товаром. Пока весь мир покупает препараты, произведенные в трех-четырёх странах. Это неправильно.

— Какого это рода препараты?

— Это таргетные, иммунные и химиопрепараты — весь спектр современного онкологического лечения.

— Вы специалист по саркомам. Какие сейчас преобладают типы сарком, как с ними справляются?

— Заболеваемость саркомами по стране на текущий момент колеблется от полутора до трех случаев на 100 тыс. населения. Есть регионы, где одни подтипы по уровню встречаемости чаще, другие реже. Мы пока не уловили связи с этническими или какими-то внешними факторами — за исключением общеизвестного фактора радиационного воздействия. Наш Чернобыль, как и последствия аварий в Японии, — печальные тому примеры.

— А возрастная зависимость здесь существует? Ведь считается, что саркомы чаще возникают у детей и молодых людей.

— Да, это болезнь молодых. У детей саркомы некоторых подтипов достигают порядка 15 на 100 тыс. населения, и это действительно много, примерно в пять-семь раз больше, чем у взрослых. Дальше идет промежуточная группа — 15–25 лет. У нас система построена таким образом, что до 18 лет — это онкопедиатрия, после 18 лет — взрослая онкология.

За последние годы в онкоортопедии произошли серьезные изменения. Если ранее выживаемость онкологических пациентов составляла около 60%, то сейчас это 72–75%. Такая положительная статистика связана в основном с успехами химиотерапии.

— В лечении сарком есть какие-то успехи, новые результаты?

— У нас очень ограниченный пул лекарственных препаратов для этой группы больных. Если посмотреть регистрационные базы по выходу в свет новых лекарственных препаратов в разных странах, то на территории России, по нашим подсчетам, в прошлом году для онкологии было зарегистрировано 27 новых наименований. Но ни один из них не подошел для сарком.

— И что же делать?

— Мы работаем, ищем, пытаемся понять биологию, потому что есть пациенты одного и того же пола, возраста, с одной и той же нозологией, распространенностью болезни, и мы им даем одну и ту же терапию. При этом один из них отвечает на лечение, другой нет. Это связано с биологией опухоли. Внутри одной нозологической группы гетерогенность опухолей очень большая. Мы знаем пока только около 10% тех нюансов, которые позволили бы нам хоть как-то прогнозировать течение этой болезни у конкретного пациента. Но многого мы еще не знаем.

— Есть ли для сарком генетическая предрасположенность? Или это заболевание, которое может появиться у каждого, и нам неясно, что здесь становится спусковым крючком?

— Часть из них возникает спорадически, часть ассоциирована с рядом генетических поломок,

вследствие которых развиваются эти мезенхимальные опухоли. Вот, например, саркомы, которые возникают у больных нейрофиброматозом. Это генетическая поломка гена *NF1*, известны все ее клинические проявления, симптоматика, и у 25–30% больных во второй-третьей декаде жизни в этих нейрофибромах, изначально доброкачественных образованиях, возникают саркомы.

— Иначе говоря, возможна профилактика, если знаешь историю своей семьи и осведомлен, что существует такой риск?

— Я понимаю, к чему вы клоните. К сожалению, это не так. Это не рак молочной железы или яичников, когда мы понимаем, что наличие мутации в том или ином гене позволяет нам более детально следить за пациентом, обозначать женщинам сроки, когда необходимо выполнить свою детородную функцию, а после этого можно убрать органы, которые становятся мишенями при этой генетической поломке. Такая операция была сделана Анджелине Джולי. Но при саркомах это, к сожалению, не работает.

— Выходит, мы не можем ничего здесь сделать?

— Предотвратить не можем. Но мы можем изучать биологию процесса, и тогда у нас появится надежда победить саркому. С этим, кстати, связана большая надежда, которую мы возлагаем на этот конгресс. Первый шаг сделан. А последующие шаги — это создание центров компетенции по стране от Калининграда до Камчатки. Основная задача — максимально локализовать клиники, которые будут заниматься лечением сложной группы больных, рядом с тем местом, где живет пациент. Хирургическое вмешательство — это быстро, и человеку несложно прилететь из того же Владивостока в Москву, провести здесь какое-то время, а затем улететь домой с уже выполненным высокотехнологическим вмешательством. А если готовить к химиотерапии, то это цикловое лечение, которое длится и полгода, и год, а некоторые болезни мы непрерывно лечим годами, и, соответственно, наша основная задача — сделать так, чтобы это было качественно и недалеко от места пребывания. Мы не должны допускать так называемой медицинской миграции, когда человек вынужден переезжать в то место, где он лечится.

— А ведь так в ряде случаев и происходит. Продадут имущество и переезжают в Москву или другой большой город. Если сравнивать ситуацию по редким опухолям в стране и в мире — мы проигрываем?

— Если взять конкретно саркомы, то ситуация такая. В США на Восточном побережье есть четыре центра, на Западном побережье — три, где этим занимаются. Расстояние — пять часов полета на самолете. При этом какие-то исследования

могут вестись, например, только на Западном побережье, а на Восточном их нет. И пациенты вынуждены предпринимать такой марш-бросок, причем обычно не в одиночку, потому что им нужна поддержка, и они везут с собой семьи. У нас ситуация в этом смысле не лучше, но и не хуже.

— Количество онкологических заболеваний, в том числе редких, возрастает. С чем, на ваш взгляд, это связано?

— Один из американских университетов проводил масштабное исследование на территории Китая, изучая частоту развития онкологических заболеваний в деревнях, где люди питаются простой пищей, дышат свежим воздухом, принимают минимальное количество животных белков, и сравнивали с тем, что происходит в агломератах. В больших городах процент таких заболеваний был статистически достоверно чаще, заболеваемость выше. Но сложно сказать, что именно влияет, — выхлопные газы, инсоляция, стиль жизни, стресс, уличное питание, недосыпы... Но факт остается фактом. Человек мегаполиса больше подвержен канцерогенезу. Индустриализация увеличивает частоту случаев рака.

— Выходит, чем больше мы приобретаем технологических возможностей, тем больше от этого страдаем. Парадокс!

— Я не готов сделать такой вывод. Здесь можно посмотреть и с другой стороны — с генетической, например. Количество генетических поломок, как известно, растет. А где живут долгожители? Не в городах, а на природе, на свежем воздухе, в горах.

— Я знаю выдающегося врача академика Ф.И. Комарова, который всю жизнь живет в городе. Ему 99 лет, и он хорошо себя чувствует.

— Да, Федор Иванович — удивительный пример долгожительства. Это, кстати, тоже к вопросу генетических поломок и, самое главное, временных рамок для них. Почему в одних случаях они происходят раньше, в других позже, в третьих не происходят вообще? В детском возрасте, например, есть часть сарком, когда мы знаем, что это поломка может реализоваться в ближайшее время. Во взрослом возрасте тоже есть такие сбои, и это целое направление редких генетически ассоциированных онкозаболеваний. Здесь важно не путать редкие генетические и редкие онкологические заболевания — это разные вещи. Хотя в мире иногда пытаются их каким-то образом объединить. Но генетик не может заниматься онкологией, так же как онколог не может заниматься клинической генетикой вне своей специальности. Поэтому здесь главное — работать по своей специальности, двигаться вперед, встречаться с коллегами и делать все, что ты можешь в данном месте в данное время. ■

Беседовала Наталья Лескова



МЕДИЦИНА

Попытка ре гене рацции

Для отвергнутого ранее лекарственного вещества
показана способность восстанавливать органы,
поврежденные из-за болезни или травмы

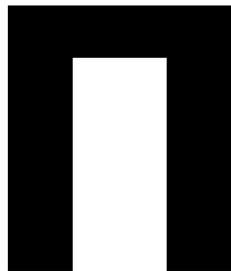
Виравут Инь и Кевин Стрэндж

ОБ АВТОРАХ

Виравут Инь (Viravuth Yin) — руководитель научной части *Novo Biosciences* и доцент Биологической лаборатории острова Маунт-Дезерт (MDIBL) в городе Бар-Харбор, штат Мэн.



Кевин Стрэндж (Kevin Strange) — биолог, генеральный директор *Novo Biosciences*, бывший президент MDIBL.



Первые мысли о восстановлении поврежденных участков тела возникли у нас после рассказа в шотландском пабе про укусы акул. В начале 2000-х гг. американский генетик Майкл Заслофф (Michael Zasloff) из Джорджтаунского университета приехал в Сент-Андрусский университет, чтобы прочесть лекцию о некоторых природных антибиотиках, найденных в коже животных. После лекции он отправился выпить с несколькими университетскими сотрудниками, и один из них, специалист по морской биологии, рассказал, что акулы часто нападают на дельфинов, оставляя раны до 45 см длиной и 12 см глубиной. Но, что удивительно, через несколько недель дельфин выздоравливает и у него не наблюдается никаких признаков инфекции.

Заслофф был поражен быстрым заживлением таких страшных ран и не мог выбросить этот разговор из головы. В течение нескольких последующих лет он читал про покусанных дельфинов и разговаривал с морскими биологами, изучавшими этих животных. В 2011 г. он опубликовал сообщение в *Journal of Investigative Dermatology* под заголовком «Наблюдения за замечательным и загадочным процессом заживления у афалин» (*Observations on the Remarkable (and Mysterious) Wound-Healing Process of the Bottlenose Dolphin*). Он отметил, что по дельфинам было непохоже, чтобы они просто заживляли порванное тело, формируя шрам из клеток другого типа; скорее, они действительно регенерировали поврежденную ткань. И вскоре после этого он позвонил одному из нас (Кевину

Стрэнджу), который в то время был президентом Биологической лаборатории острова Маунт-Дезерт (MDIBL) и продвигал изучение природных и синтетических веществ, стимулирующих регенерацию. Заслофф предположил, что некоторые антибиотики, обнаруженные им в коже животных, могут также способствовать регенерации. Все, что помогает организму восстановить или заместить клетки, разрушенные в результате болезни или травмы, может иметь важное медицинское значение.

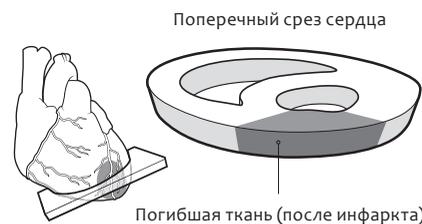
Спустя шесть лет после того телефонного звонка мы втроем (Инь, Стрэндж и Заслофф) продемонстрировали, что природный антибиотик под названием *MSI-1436*, первоначально найденный Заслоффом у небольшой акулы, хорошо стимулирует восстановление разных поврежденных органов

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

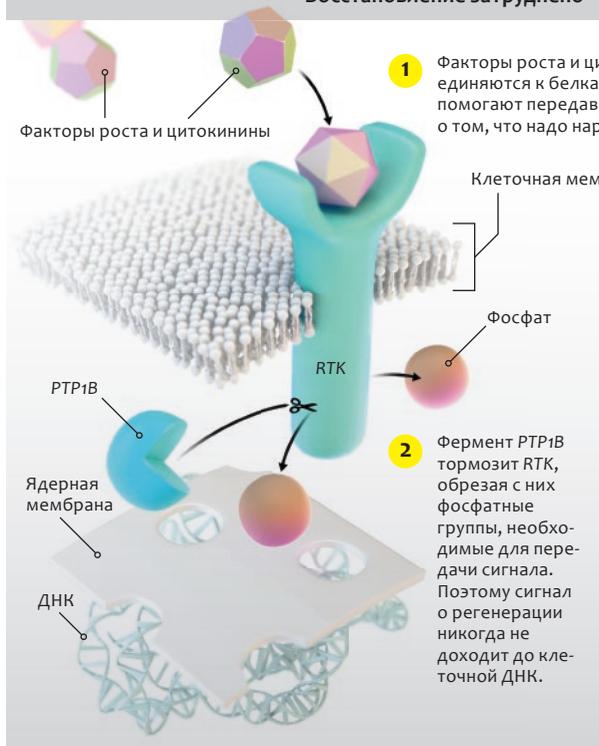
- Лечение стволовыми клетками упоминается во многих новостях о заживлении и восстановлении поврежденных частей тела, однако успехи в этой области невелики.
- В экспериментах на животных показано, что вещество под названием *MSI-1436* может оказаться весьма перспективным. Оно растормаживает естественные способности организма к регенерации клеток.
- Эта молекула, первоначально предназначенная для лечения диабета у людей, успешно прошла проверку на безопасность для человека, что очень важно для разработки лекарственного средства.

Восстановитель тела

В обычных условиях способность клеток и органов регенерировать после повреждения ограничена. Например, после инфаркта молекулы, которые называются «факторы роста» и «цитокинины», поступают в сердце, чтобы стимулировать рост новой ткани, но их сигнал блокируется специальным ферментом. Умершие клетки сердца не замещаются новыми. Однако если мышам с поврежденным сердцем ввести вещество под названием MSI-1436, оно ингибирует активность мешающего фермента. В результате образуются новые сердечные мышцы, способные к сокращениям.

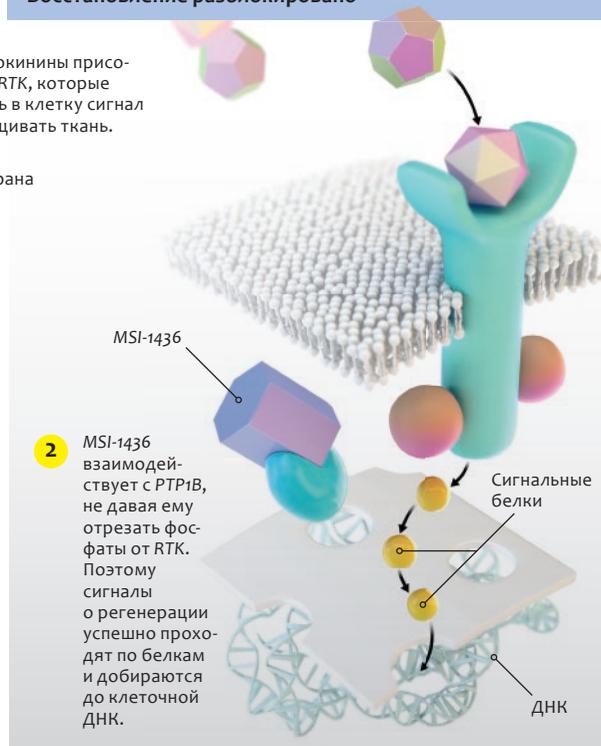


Восстановление затруднено



- 3 Поскольку передача сигнала прервана, мертвые клетки сердечной мышцы не заменяются новыми, здоровыми. На месте омертвевшей ткани образуется рубец, ослабляющий сердце.

Восстановление разблокировано



- 3 Сигналы запускают регенерацию клеток. Взамен поврежденных вырастают новые волокна сердечной мышцы, восстанавливается способность органа перекачивать кровь.

у рыб данियो-рерио и способствует регенерации сердечной мышцы у мышей. По-видимому, это вещество снимает некоторые молекулярные «тормоза», сдерживающие природную способность тканей к регенерации после повреждения. У мышей, на которых моделируют человеческую мышечную дистрофию, оно, по-видимому, замедляет дегенерацию мышц. Мы пока экспериментируем с животными и не продемонстрировали эти эффекты на людях, но MSI-1436 имеет важное преимущество по сравнению с множеством других лекарственных средств, которые кажутся

многообещающими в пробирке, но оказываются непригодными в клинике: MSI-1436 безопасно для людей.

В 2007 г. это вещество тестировали в качестве возможного средства для лечения ожирения и диабета II типа, поскольку оно повышает чувствительность клеток к инсулину. Исследования, регулируемые Управлением по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA), показали, что MSI-1436 хорошо переносится в высоких дозах и не вредит пациентам. Но поскольку препарат представлен жидким раствором для

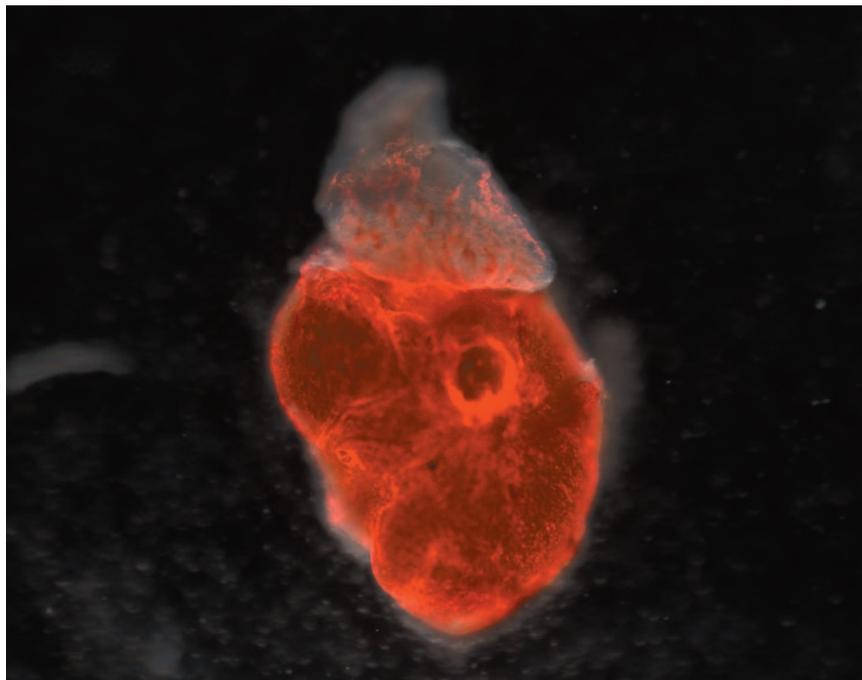
ежедневных инъекций, он вряд ли оказался бы популярен у пациентов, потому что у них уже есть альтернативные более удобные варианты в виде таблеток. Фармакологические компании не заинтересовались MSI-1436.

Однако медицинских возможностей для регенерации поврежденных клеток на сегодня не так много. Часто пишут о стволовых клетках — неспециализированных клетках, которые при получении определенных сигналов могут дать начало множеству типов высокодифференцированных клеток, образующих человеческое тело. Теоретически они могут восстанавливать поврежденные части. К сожалению, несмотря на многолетние клинические испытания и другие тесты, трансплантация стволовых клеток по-прежнему малоэффективна и связана с другими серьезными проблемами. Единственное, что сегодня широко применяется, — это пересадка костного мозга для лечения заболеваний крови. Но MSI-1436, безопасность которого доказана, может оказаться полезным для регенеративной медицины, восстанавливая повреждения после инфарктов и, возможно, и после других разрушительных заболеваний.

План по восстановлению

Многие животные обладают поразительными регенеративными способностями. Саламандры после потери конечности способны вырастить новую. Похожая на угря минога может восстанавливать поврежденный спинной мозг. Данио-рерио, популярный вид аквариумных рыб, который широко используют в биомедицинских исследованиях, может регенерировать поврежденные почки, сердце, поджелудочную железу и плавники. Возьмите почти любую ткань или орган — и, вероятно, найдется животное, способное легко это восстанавливать.

Даже люди немного участвуют в этой игре регенерации. Кажется, что наши способности очень ограничены, однако клетки наших кожи, крови и кишечника постоянно обновляются. После небольших повреждений в мышцах могут образовываться новые клетки. И, подобно Прометею из греческой легенды, у которого постоянно регенерировала печень, мы тоже можем восстанавливать данный орган после умеренных повреждений. Итак, наши клетки обладают этой способностью, но она ослабляется и выключается, особенно с возрастом. Тем не менее, поскольку такие способности



В сердце данио-рерио после повреждения вводилось вещество MSI-1436. Мышцы быстро возобновились, и восстановилась способность органа перекачивать кровь.

первоначально существуют, мы предположили, что их можно включить обратно с помощью соответствующих молекулярных сигналов. Конечно, сначала надо найти такие сигналы. Логично было поискать их у быстро регенерирующих животных.

В процессе поиска антибиотиков у животных Заслофф наткнулся на класс веществ, которые называются «аминостеролы», MSI-1436 — это одно из них. Эти вещества могут стимулировать регенерацию, поскольку регулируют клеточную активность, например рост. Мы решили проверить возможности данных веществ с помощью данио-рерио. Поскольку рыба — позвоночное, у нее основные органы те же, что у людей, и примерно 70% ее генов эквивалентны человеческим. На стадии эмбриона рыбки прозрачны, что облегчает изучение их анатомии. Мы хотели посмотреть, сможет ли какой-нибудь из аминостеролов ускорить и улучшить способность ткани рыб к регенерации.

Мы начали с простого теста на ампутацию: отрезали часть хвоста и добавляли различные аминостеролы в воду в аквариуме. Ничего не произошло. Однако все изменилось благодаря помощи недавней выпускницы Хелен Робертс (Helen Roberts), работавшей стажером в лаборатории у Иня. Робертс разработала методики введения вещества непосредственно в рыбу, вместо того чтобы добавлять его в воду. Когда она проделала это с MSI-1436, вещество ускорило регенерацию хвостового плавника более чем в три раза. Вместо обычных 10–12 дней на восстановление плавника

потребовалось всего лишь три-четыре дня, и не наблюдалось никаких признаков аномального роста. Мы попросили Робертс и лаборанта независимо повторить эксперименты с разными веществами так, чтобы они не знали, что они вводят в рыбу. *MSI-1436* всегда срабатывало в отличие от других веществ. Это было потрясающе, и в офисе Стрэнджа раздались восторженные восклицания, которые было бы неуместно процитировать в этой статье.

Каким образом *MSI-1436* могло так сильно стимулировать регенерацию? После того как мы провели дальнейшие эксперименты, некоторые ученые исследовали его действие на клетки. Оказалось, что все довольно просто: *MSI-1436* связывается с белком протеиновой тирозинфосфатазой *1B (PTP1B)*, которая выполняет несколько функций в организме, в том числе регулирует рост новых клеток. Это важная задача, поскольку обширный неконтролируемый рост может привести к нарушению работы органа или оказаться раковым заболеванием. По сути, *PTP1B* тормозит регенерацию клеток. Наше вещество убирало торможение, но только в поврежденных местах, локально и контролируемо.

Когда *PTP1B* тормозит регенерацию, он взаимодействует с важным классом клеточных белков — тирозинкиназными рецепторами (*RTK*). *RTK* встроены в клеточные мембраны и представляют собой части сигнальных путей, начинающихся снаружи клетки и ведущих внутрь, по этим путям в клетку поступает сигнал расти и делиться. Чтобы стать активными и передавать подобные сигналы, *RTK* должны присоединить фосфатные группы. *PTP1B* мешает процессу, отрезая фосфатные группы. Нет фосфата — нет передачи сигнала с помощью *RTK* — нет клеточной регенерации. Но наше вещество, *MSI-1436*, лишает *PTP1B* возможности отрезать фосфаты. И когда это торможение выключено, *RTK* и клеточная регенерация благополучно работают.

Пороки сердца и инфаркты

Помимо отрастания хвостового плавника у данио-рерио, мы обнаружили, что наш блокатор *PTP1B* стимулирует регенерацию сердечной мышцы у рыбы. Это весьма важно, поскольку хвостового плавника у человека нет, а сердце есть, и этому органу нередко требуется помощь. Сердечно-сосудистые заболевания — основная причина смерти в мире, они убивают 18 млн человек ежегодно, и 85% смертей вызваны инфарктом и инсультом. Клетки сердечной мышцы, гибнущие при инфаркте, не регенерируют, на их месте образуется рубец, который увеличивает вероятность повторного инфаркта. На протяжении 45 лет предпринимались поиски лечения, рассматривалась возможность пересадки стволовых клеток, но все было безуспешно.

Поэтому когда мы увидели, что *MSI-1436* помогает рыбам, мы начали тестировать его на мышах, поскольку эти модельные животные широко используются при исследовании болезней сердца. Мы вызывали инфаркт у грызунов, а затем вводили им *MSI-1436* раз в три дня в течение четырех недель. Способность сердца перекачивать кровь улучшалась более чем в два раза, количество рубцовой ткани сократилось на 50%, а клетки сердечной мышцы в месте повреждения разрастались примерно в шесть раз сильнее. *MSI-1436* — единственная известная небольшая молекула с таким эффектом.

Недавно мы начали тестировать это вещество на мышах с моделью совершенно иного заболевания: мышечной дистрофии Дюшенна. Это медленное дегенеративное заболевание с атрофией мышц, совсем не похожее на внезапное повреждение при инфаркте. По нашим предварительным данным, *MSI-1436* вызывает клеточную регенерацию, достаточную для того, чтобы не допустить истощения скелетных и сердечных мышц. Оно не останавливает болезнь, но может смягчить симптомы.

От животных к людям

Поскольку вещество стимулирует регенерацию ткани и у рыб, и у взрослых мышей, есть надежда, что оно поможет людям. Предки мышей и данио-рерио разошлись друг от друга 450 млн лет назад. Поскольку *MSI-1436* действует на столь разные организмы, скорее всего вещество работает с теми клеточными путями, которые в процессе эволюции сохранялись неизменными или начали использоваться заново. Таким образом, достаточно высока вероятность того, что эти пути работают и у людей и что на них можно воздействовать подобным способом.

Тестирование возможных лекарств на разнообразной человеческой популяции сильно отличается от строго контролируемых лабораторных исследований на животных. Вероятность неудачи в клинических испытаниях весьма высока. И хотя в отношении *MSI-1436* есть веские причины для оптимизма, на самом деле, не опробовав его на людях, мы не знаем, эффективно ли вещество для лечения инфаркта у человека. В качестве первого шага мы начали финансируемое Национальными институтами здравоохранения тестирование этого вещества при инфарктах у свиней. Свиное сердце удивительно похоже на человеческое, а размер животного позволяет нам имитировать на свинье человеческий инфаркт и ранние стадии лечения гораздо лучше, чем это можно сделать на мышах. Если испытания на свиньях окажутся успешными, мы сможем просить *FDA* разрешить проведение клинических испытаний.

В наших исследованиях мы будем следить за признаками появления рака. В регенеративной медицине всегда есть опасение, что средство для стимулирования роста и восстановления ткани может запустить неконтролируемое деление, характерное для раковых клеток. Мы считаем, что для *MSI-1436* это маловероятно. Чтобы выявить, не вызывает ли это вещество рак, ранее с ним уже были выполнены обширные проверки на токсичность, когда его рассматривали в качестве возможного лекарства от диабета и ожирения. Проблем не обнаружили, и *FDA* сочло, что *MSI-1436* безопасно использовать в исследованиях на людях. Ограничение количества *PTP1B* тоже кажется доста-

Возможно, животные хорошо реагируют на *MSI-1436* потому, что оно возникло у животных. Его не выделяли из генетически модифицированной лабораторной мыши или при проверке десятков тысяч синтетических веществ в фармакологической компании

точно безопасным. Ген, отвечающий за синтез этого вещества, был впервые выключен у мышей в 1999 г. Мышей тщательно изучали. У них не обнаружилось никаких признаков повышенного роста опухолей, а это означает, что даже долговременное ингибирование *PTP1B* не вызывает рака. Кроме того, использование *MSI-1436* для стимуляции регенерации тканей при лечении, вероятно, продлится всего несколько недель или месяцев.

Наконец, наши собственные эксперименты показывают, что *MSI-1436* действует только в месте повреждения и не запускает у клеток в нормальной ткани ракового поведения. При лечении повреждений с помощью этого вещества у данио-рерио и мышей мы не наблюдали разрастания тканей или нарушений формы органов (то есть признаков злокачественного роста). Мы проверили эту возможность и для очень чувствительного периода в развитии рыб — начиная с одноклеточной стадии эмбриона данио-рерио. Эмбрионы, которым вводили вещество 14 дней подряд, выросли нормальными животными. Переход от одной клетки к полноценному животному — сложный процесс

с очень интенсивным делением и дифференцировкой клеток. На ранних этапах развития многие лекарства и факторы среды легко выбивают его из колеи. Хорошо, что *MSI-1436* этого не делает.

Преимущество естественности

Возможно, животные хорошо реагируют на это вещество в первую очередь потому, что оно возникло у животных. Его не выделяли из генетически модифицированной лабораторной мыши или из клеток, растущих в чашке Петри в медицинском центре, или при проверке десятков тысяч синтетических веществ в фармакологической компании. Наши выводы были сделаны на основе знаний, полученных от дельфинов, акул и данио-рерио. Биологическая лаборатория острова Маунт-Дезерт, где мы воспользовались этими знаниями, была основана на побережье штата Мэн в 1898 г. как морская исследовательская станция, где биологи могли немедленно встретиться с естественной средой, которую они пытались изучить.

К сожалению, у крупных биомедицинских исследовательских предприятий и у фармакологической промышленности такой связи с природой нет. Разумеется, молекулы, сконструированные компьютером, важны. Однако специалист по регенеративной медицине, не участвовавший в нашем исследовании, Алехандро Санчес Альварардо (Alejandro Sánchez Alvarado) из Института медицинских исследований Стоуэрса сказал нам, что *MSI-1436* — это «отличный пример того, что бывает, когда ученые решают оставить привычное и поискать решение волнующих медицинских проблем в природе».

Перевод: М.С. Багоцкая

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Джабр Ф. Новое сердце // ВМН, № 7–8, 2013.
- Observations on the Remarkable (and Mysterious) Wound-Healing Process of the Bottlenose Dolphin. Michael Zasloff in Journal of Investigative Dermatology, Vol. 131, No. 12, pages 2503–2505; December 2011.
- Rethinking Differentiation: Stem Cells, Regeneration, and Plasticity. Alejandro Sánchez Alvarado and Shinya Yamanaka in Cell, Vol. 157, No. 1, pages 110–119; March 27, 2014.
- The Protein Tyrosine Phosphatase 1B Inhibitor *MSI-1436* Stimulates Regeneration of Heart and Multiple Other Tissues. Ashley M. Smith et al. in npj Regenerative Medicine, Vol. 2, Article No. 4; March 3, 2017.

Всё, всем, всегда ДОСТУПНО



Номера журнала за все годы
читайте в **любом удобном** для вас формате

ЦИФРОВЫЕ РЕСУРСЫ

Мгновенный доступ к текущему номеру и архиву с января 2012 г. с вашего iPad

www.sciam.ru



Google play



**В мире
науки**

SCIENTIFIC
AMERICAN

Ежемесячный
научно-информационный
журнал

ЗДРАВООХРАНЕНИЕ

ФИАСКО С ДЕНГЕ

Делает ли мгновенная иммунная реакция
небезопасной вакцину против лихорадки денге?

Мадхусри Мукерджи и Сима Ясмин



Комары *Aedes aegypti* переносят несколько опасных вирусов, в том числе тех, которые вызывают лихорадку денге. Первый укус обычно вызывает заболевание средней тяжести, а второй может быть летальным. С этим, в частности, связаны трудности с вакцинацией против лихорадки денге.

ОБ АВТОРАХ

Мадхусри Мукерджи (Madhusree Mukerjee) — главный редактор отдела по науке и социологии *Scientific American*.

Сима Ясмин (Seema Yasmin) — руководитель проекта *Stanford Health Communication Initiative* в Стэнфордском университете, где она преподает научную журналистику. Лауреат премии «Эмми», врач и автор множества статей в *Scientific American*.



В ДЕКАБРЕ

2015 Г.

Бенигно Акино III, тогдашний президент Филиппин, договорился с фармацевтической компанией *Sanofi* о поставке 3 млн доз *Dengvaxia*, первой получившей лицензию вакцины против лихорадки денге. Предполагалось, что каждый из 1 млн школьников, достигших девяти лет, получит три дозы этой вакцины и избежит худших последствий заражения: шока, повреждения внутренних органов и смерти.

Вирус, вызывающий лихорадку денге, представлен тремя разновидностями. Переносчиками всех их служат самки комара рода *Aedes*, прежде всего — *Aedes aegypti*. Обычно они кусают людей в дневное время суток, когда те не защищены от насекомых прикроватными сетками. В течение последних 50 лет эти вирусы, родственные возбудителям лихорадки Западного Нила, желтой лихорадки и лихорадки Зика, волнами прокатывались

по тропическим и субтропическим регионам земного шара, что сопровождалось 30-кратным повышением заболеваемости лихорадкой денге. Ежегодно инфекция поражала 390 млн человек.

Не каждое заражение вирусом лихорадки денге приводит к заболеванию: трое из четырех, которых укусил комар-переносчик, не проявляют никаких симптомов. У остальных может возникнуть целый букет симптомов: повышение температуры, характерное для многих других вирусных заболеваний; так называемая лихорадка денге, характеризующаяся головной болью, болью в глазах, суставах и костях, в редких случаях — кровотечением и серьезным синдромом, включающим геморрагическую лихорадку и шок. В тяжелых случаях плазма крови просачивается сквозь стенки капилляров, вокруг органов скапливается жидкость, возникает обильное внутреннее кровотечение, отказывают головной мозг, почки и печень. Срочная госпитализация и интенсивная терапия могут спасти жизнь пациентов, но все равно каждый год от лихорадки денге погибает более 20 тыс. больных, в основном детей.

Работники здравоохранения и врачи долго ждали появления вакцины против этого ужасного заболевания. Но когда терапевт Антонио Данс (Antonio Dans) и педиатр Леонила Данс (Leonila Dans) из Медицинского колледжа Филиппинского университета узнали о намерении Акино III провести массовую вакцинацию детей, первой их мыслью была финансовая сторона вопроса. Одна

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Жертвами лихорадки денге, возбудителем которой выступает вирус, переносимый комарами, ежегодно становятся 400 млн человек по всему земному шару. Большинство впервые инфицированных даже не замечают, что они больны, но второй укус комара может быть смертельным.
- Теория антителозависимого усиления (ADE) объясняет, почему вторая инфекция гораздо опаснее первой. Последующие исследования подтвердили справедливость этой старой теории.
- Первая получившая лицензию вакцина, по-видимому, имитировала первичное заражение, возможно, создавая условия для более сильного действия второго укуса. Роль ADE в иницировании этого феномена остается спорной.



У ребенка из Манагуа берут пробу крови (1) в рамках обширной программы по исследованию распространенности лихорадки денге; одна из улиц Манагуа (2)

Внимательно прочитав предварительный отчет о результатах клинических испытаний исследователей из *Sanofi Pasteur* — подразделения *Sanofi*, которое занимается вакцинами, — Антонио Данс и Леонила Данс нашли еще один повод для беспокойства. Среди детей из азиатских стран в возрасте от двух до пяти лет, получивших вакцину, частота госпитализации по поводу заболевания лихорадкой денге спустя три года после прививки в семь раз превышала таковую среди невакцинированных. Об-

наружилось, что хотя для детей старшего возраста эта частота ниже, статистически невозможно предсказать, каким будет исход для конкретного ребенка.

только стоимость *Dengvaxia* составляла \$57,5 млн, а в целом компания обошлась бы дороже, чем вся национальная программа вакцинации за 2015 г., включая вакцинацию от пневмонии, полиомиелита, столбняка, коклюша, дифтерии, кори, свинки и краснухи. И при этом был бы охвачен всего 1% из 105 млн жителей страны. Несмотря на то что ежегодно от лихорадки денге умирает в среднем 750 филиппинцев, она по летальности не входит в десятку самых смертоносных заболеваний, даже не приближаясь к таким инфекционным болезням, как пневмония и туберкулез.

В марте 2016 г. Антонио и Леонила Данс вместе с другими медиками обратились к министру здравоохранения Филиппин Джанетт Гарин (Janette Garin) с письмом, в котором выражалась обеспокоенность по поводу небезопасности вакцинации для некоторых детей и дефицита квалифицированных специалистов, которые должны отслеживать состояние здоровья всех, кому сделана

вакцину.

Как антитела отягчают лихорадку денге

Переносчики возбудителя лихорадки денге — это четыре вида комаров рода *Aedes*. В 1970 г. Скотт Холстед сформулировал гипотезу, объясняющую, почему второй укус комара, принадлежащего к другому виду, более опасен. При первом заражении, скажем, вирусом денге 1, В-клетки начинают вырабатывать антитела, которые связываются с вирусными частицами и предъявляют их особым элементам иммунной системы — макрофагам. Последние поглощают эти частицы и уничтожают их.

Затем В-клетки переходят в состояние покоя и «просыпаются» только после повторной инфекции, продуцируя такие же антитела, как и раньше. Но они не связываются надлежащим образом с вирусными частицами, скажем, типа 2. Антитела по-прежнему предъявляют агрессора макрофагам, но те на него не реагируют. Попав внутрь макрофага, вирус использует его клеточные механизмы для усиленной репликации и наводняет весь организм. Он вырабатывает белок, повреждающий стенки кровеносных сосудов, и болезнь переходит в тяжелую форму.

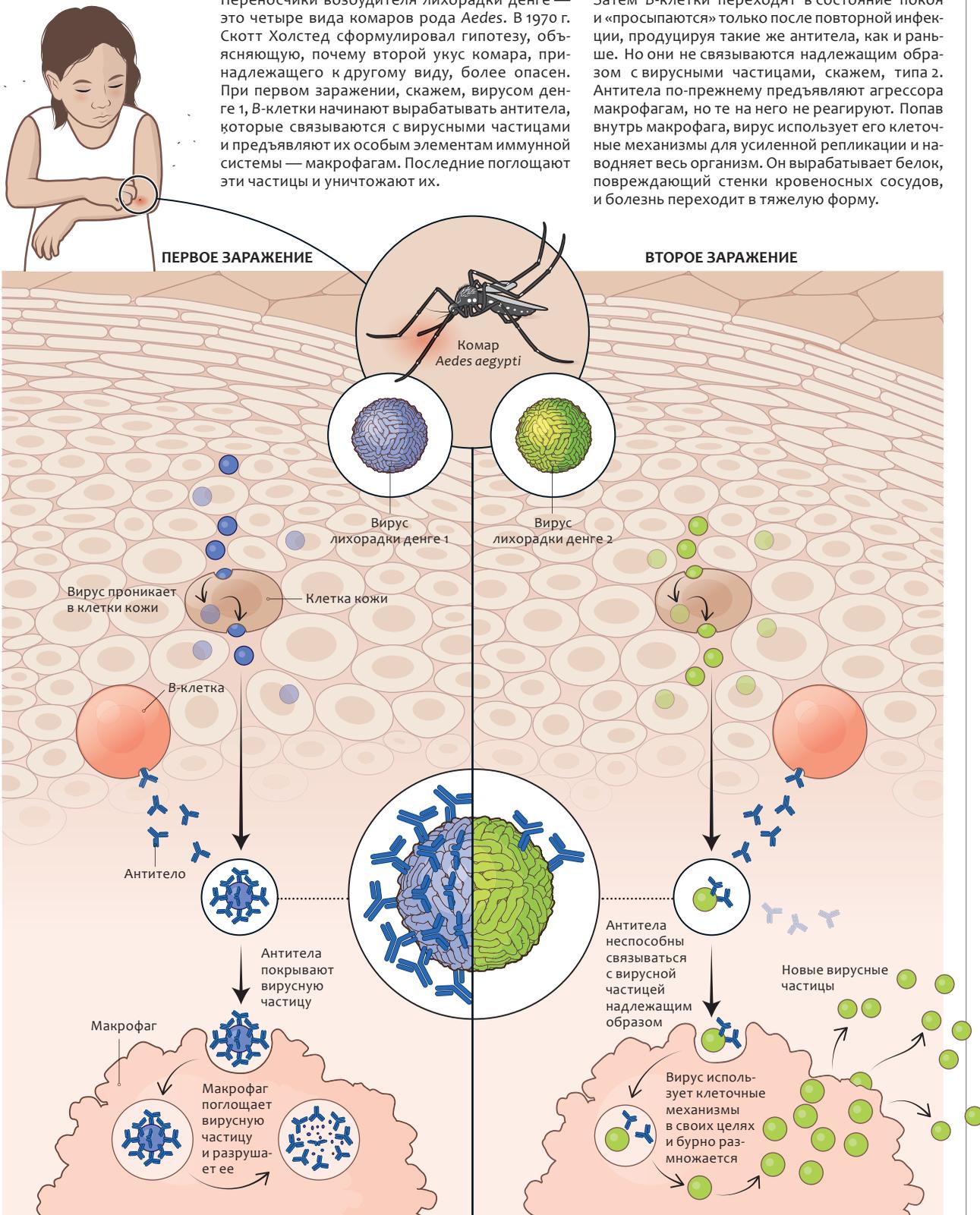


Illustration by Tami Tojpa

прививка, с тем чтобы выявлять нежелательные последствия. «Потенциально безопасная вакцина вот-вот появится, и возможно, следует подождать, пока она станет доступной», — высказали свое мнение авторы обращения.

Однако в это же время группа высококвалифицированных консультантов по вакцинам при Всемирной организации здравоохранения заявила на брифинге, посвященном *Dengvaxia*, что среднестатистическое число госпитализаций вакцинированных детей, согласно результатам наблюдений в течение нескольких лет, статистически невелико. «Никаких тревожных сигналов ни в одной возрастной группе детей старше пяти лет не наблюдалось», — заявили они. Теоретически возможно все, и для достижения компромисса относительно массовой вакцинации против лихорадки денге необходимо продолжить исследование. Тем не менее «это мероприятие следует включить как составную часть программы по рутинной иммунизации в соответствующих регионах», — посчитали консультанты. К последним относятся территории, где 70% населения уже переболело лихорадкой денге и где иммунизация в раннем возрасте могла уменьшить число госпитализаций на 30% за 30 лет. В заключительном документе утверждалось, что для детей в возрасте девяти лет и старше вакцина безопасна.

Для Антонио и Леонила Данс не стал неожиданностью тот факт, что власти проигнорировали их доводы. «Вы верите либо нам, либо ВОЗ, — говорит Антонио Данс. — На их месте я скорее поверил бы ВОЗ. В конце концов, кто мы такие? Обычные преподаватели в небольшой медицинской школе». Власти Филиппин, по-видимому, были так уверены в безопасности вакцины против лихорадки денге, что не обязали *Sanofi Pasteur* представить результаты испытаний, в которых проверяется безопасность новых лекарственных препаратов для данной местности. «Процедура включения нового продукта в ту или иную национальную программу обычно занимает от трех до пяти лет», — говорит Энтони Леачон (Anthony Leachon), бывший президент Филиппинской коллегии врачей. Однако вакцинация против лихорадки денге началась без промедления, в апреле 2016 г.

Спустя несколько дней пришло сообщение о первой смерти после прививки — умер мальчик с врожденным пороком сердца. На встрече с журналистами Гарин заявила, что трагедия никак не связана с прививкой. Данс, однако, утверждал, что если ребенок до того не болел лихорадкой денге, то вакцинация может быть гораздо более опасной, чем если бы он ранее перенес это заболевание. В качестве основания для такого суждения приводилась теория так называемого антителозависимого усиления. Гарин, в свою очередь, выдвинула собственные аргументы, заявив,

что выступающий с дезинформацией относительно *Dengvaxia* будет ответствен за смерть каждого не получившего вакцину ребенка.

Такая ситуация сохранялась до ноября 2017 г., когда *Sanofi Pasteur* выступила с собственными рекомендациями: те, кто никогда не был инфицирован вирусом лихорадки денге, не должен получать вакцину *Dengvaxia*. Через месяц такие же рекомендации поступили от ВОЗ. В декабре власти Филиппин остановили реализацию программы массовой вакцинации, но прививка уже была сделана 830 тыс. школьников. По данным Министерства здравоохранения, на сентябрь 2018 г. от различных болезней умерли 154 вакцинированных ребенка. В большинстве случаев это не было связано с прививками, но клинические данные и результаты анализа крови показали, что 19 детей умерли именно от лихорадки денге.

Sanofi Pasteur утверждает, что их смерть объясняется невозможностью защититься от лихорадки денге абсолютно всех вакцинированных. Некоторые специалисты, в том числе Антонио и Леонила Данс, в отличие от этого считают, что *Dengvaxia* имитирует предыдущий контакт с вирусом и подготавливает организм пациента к повторной встрече с инфекцией. Такое противоречие не привело к прекращению вакцинации против лихорадки денге; сегодня *Dengvaxia* получила лицензию в 20 с лишним странах. В октябре 2018 г. Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA) одобрило применение вакцины в эндемичных регионах США, таких как Пуэрто-Рико, при том что на Филиппинах еще не завершено расследование по поводу смерти вакцинированных детей, а *Sanofi Pasteur* не опубликовала окончательных результатов шестилетних клинических испытаний.

Таинственное заболевание

При повторном контакте с человеком большинство вирусов, например вирус кори, проявляют гораздо меньший патогенный эффект, чем при первом. С вирусом лихорадки денге все обстоит наоборот. Над этой загадкой биологи и врачи бьются уже многие годы. В 1950–1960-х гг., когда в странах Азии стали одна за другой вспыхивать эпидемии заболевания, они даже усомнились в том, что имеют дело с одной и той же инфекцией. А может быть, вирус мутировал? Или ослабла иммунная система?

Поисками ответа на все эти вопросы занялся только что окончивший медицинскую школу Скотт Холстед (Scott B. Halstead), который изучал переносимые комарами вирусы с 1957 г., со времени службы в армии США в Японии. Он впервые столкнулся со вспышкой лихорадки денге четыре годами позже, когда работал в военной лаборатории, располагавшейся дверь в дверь с Детской

больницей Бангкока. Врачи посчитали, что маленькие пациенты, поступившие в больницу, чем-то отравились; четверть из них умерли. Но Холстед и его группа установили, что виновником трагедии была лихорадка денге. Ими было сделано еще одно озадачившее всех открытие. Дети, инфицированные второй раз, но другой разновидностью вируса, а также младенцы, чьи матери были привиты от лихорадки денге, чаще серьезно заболевали и погибали. Почему — никто не знал.

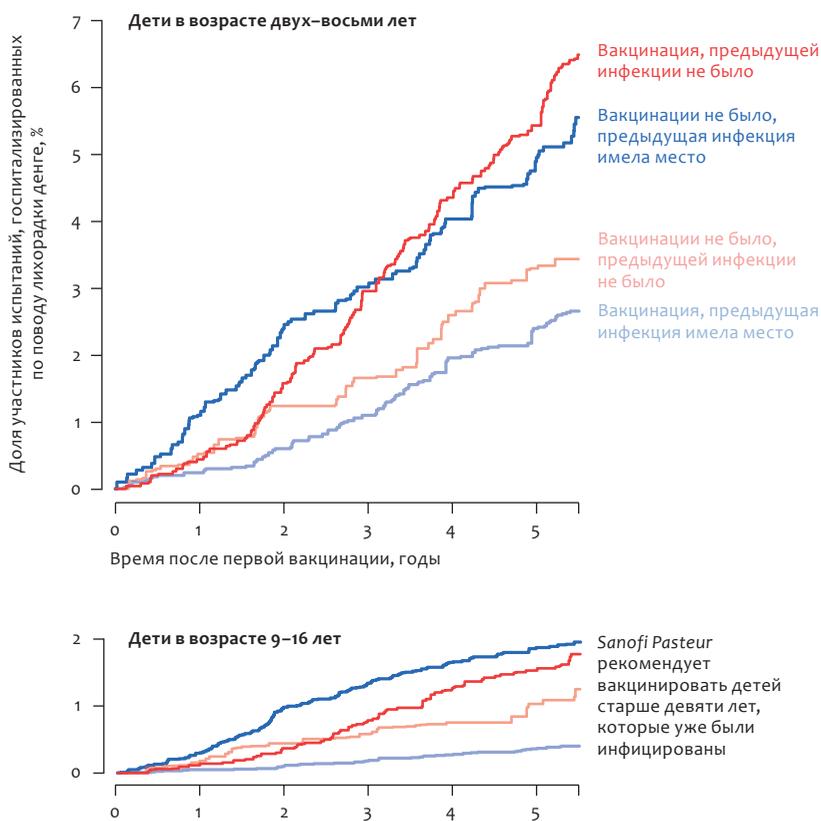
В 1964 г. Ричард Хоукс (Richard A. Hawkes) из Австралийского национального университета в Канберре обнаружил, что при заражении культуры клеток энцефалитом долины Муррея, лихорадкой Западного Нила или японским энцефалитом инфицируется больше клеток, если в культуру добавить антитела. Хоукс предположил, что антитела стабилизируют вирусные частицы и повышают их способность присоединяться к клеткам. Независимо от Хоукса подобные явления наблюдал Холстед для вируса лихорадки денге.

Для того чтобы выяснить, почему контагиозность и летальный эффект вируса лихорадки денге повышаются при повторном заражении, Холстед инфицировал 118 обезьян разными комбинациями из четырех вирусов-возбудителей и определил содержание вирусных частиц в крови животных. Результаты, опубликованные в 1973 г., показали, что у некоторых обезьян, инфицированных второй раз и при этом другой разновидностью вируса, титр вируса гораздо выше. Через четыре года Холстед обнаружил возможное объяснение данного феномена и назвал его антителозависимым усилением (*antibody-dependent enhancement, ADE*).

Предположим, что в первый раз вас заразил вирус *DENV-1*. Антитела к нему могут циркулировать в крови десятилетиями, иногда всю жизнь. Во второй раз возбудителем был вирус *DENV-2*, *DENV-3* или *DENV-4*. Парадоксально, но факт: антитела против *DENV-1* ускоряли размножение этих вирусов, что часто приводило к гибели больного.

Безопасна ли *Dengvaxia*?

Используя новый метод тестирования, исследователи из *Sanofi Pasteur* выясняют, кто из детей — участников клинических испытаний *Dengvaxia* был инфицирован до вакцинации. Обнаружилось, что если ребенок ранее контактировал с вирусом (синие кривые), то вакцина эффективно защищает его. Если же никаких признаков более раннего инфицирования не обнаруживается (красные кривые), то ребенок с гораздо большей вероятностью, чем невакцинированный, заболевает даже спустя несколько лет после прививки. Этот феномен выражен в гораздо большей степени у маленьких детей (верхний график), у которых чаще, чем у детей более старшего возраста (нижний график), болезнь протекает в тяжелой форме.



Согласно Холстеду и другим исследователям, феномен ADE заключается в следующем. Вирус лихорадки денге состоит из молекулы РНК, заключенной в белковую капсулу с характерными выступами на поверхности. При первом заражении В-клетки иммунной системы вырабатывают антитела под названием «иммуноглобулины G» (IgG), которые связываются с вирусными частицами. Антитела предъявляют последних таким компонентам иммунной системы, как макрофаги («фаг» в переводе с греческого означает «пожиратель»). Они поглощают вирусные частицы и переваривают их с помощью ферментов.

Если пациент справился с инфекцией, некоторое количество вырабатывающих антитела В-клеток переходит в спящее состояние. При втором заражении другой разновидностью вируса эти клетки активизируются и начинают вырабатывать такие

же антитела, как и при первом. Холстед предположил, что некоторые из них по-прежнему связываются с вирусными частицами и предъявляют их макрофагам, но те не иммобилизуют свою «пищеварительную систему», и оставшиеся интактными вирусные частицы направляют ресурсы, которые они могли бы потратить на борьбу с макрофагами, на усиленную репликацию. Таким образом, антитела помогают новым вирусным частицам вырабатывать в 1 тыс. раз больше копий, чем если бы репликация происходила в обычных условиях.

Ответом на гипотезу Холстеда было безразличие или недоверие коллег. Сегодня, в свои 89 лет, он занимает должность приглашенного профессора Университета медицинских наук в Бетесде, штат Мэриленд. Многие эксперты по лихорадке денге называют его крестным отцом ADE. «В те давние времена я считал, что сделал очень важное открытие, — вспоминает он. — Смущало только то, что никто не верил в его реальность».

Через 40 с лишним лет Ева Харрис (Eva Harris), специалист по лихорадке денге из Калифорнийского университета в Беркли, доказала, что феномен ADE не просто существует, но и вносит вклад в возникновение этого заболевания в тяжелой форме у детей. Харрис не собиралась доказывать существование или отсутствие самого феномена. Вместо этого она с коллегами, в число которых входила специалистка по статистическому программированию Ли Кацельник (Leah Katzelnick), занялись исследованием того, каким образом вирус лихорадки денге вызывает заболевание. Исследование привело к появлению в Никарагуа специализированной лаборатории и запуску одного из самых смелых проектов в области педиатрии: Харрис с коллегами из Манагуа, столицы Никарагуа, вознамерились вести наблюдение за тысячами детей.

В течение 15 с лишним лет они работали над реализацией проекта, занимаясь лечением заболевших детей и посещая их дома, чтобы брать пробы крови. Среди 6684 обследованных они выявили 618 больных, из них почти четыре дюжины серьезно. Собрав за все эти годы более 41 тыс. проб крови, ученые сделали поразительное открытие. Дети с вполне определенной концентрацией антител в крови — не слишком низкой, чтобы не играть никакой роли, и недостаточно высокой, чтобы противостоять инфекции, — подвергались в восемь раз более высокому риску заболеть геморрагической лихорадкой денге, чем те, у кого концентрация антител находилась вне этих рамок.

ADE-гипотеза без труда объясняла этот факт. Если бы антител в организме не было вообще или они присутствовали в очень низкой концентрации, их влияние на ход последующей инфекции не могло бы привести к серьезному заболеванию. При высокой их концентрации (как это бывает

сразу после первого заражения) они содействовали бы уничтожению новых вирусных частиц макрофагами. Если, однако, их концентрация находилась в пределах «опасного диапазона» (по терминологии Харрис), они способствовали бы поглощению вирусных частиц макрофагами, но не инактивировали их, ускоряя тем самым репликацию.

Статья Харрис в журнале *Science* с изложением полученных ею результатов поколебала твердую убежденность в своей правоте стойких противников ADE-гипотезы и внесла весомый вклад в разгадку тайны вакцины против лихорадки денге.

Красный флаг

По случайному совпадению через день после выхода в свет статьи Харрис в ноябре 2017 г. *Sanofi Pasteur* выступила с заявлением, вызвавшим ярость филиппинцев. В соответствии с ним запрещалось вакцинировать людей, которые ранее не переболели лихорадкой денге. Через месяц к таким требованиям присоединилась ВОЗ.

Именно к этому призывал Холстед начиная с марта 2016 г., когда была опубликована его статья о небезопасности *Dengvaxia* в журнале *Vaccine*. По-видимому, для тех, кто не болел лихорадкой денге, вакцина играла роль первой инфекции, способствуя тому, что реальная инфекция превращалась в тяжелое заболевание. Маленькие дети за свою короткую жизнь с меньшей вероятностью подвергались заражению, и для них вакцина была первой встречей с вирусом. У них чаще, чем у взрослых, болезнь принимала угрожающий характер после второго заражения (что и наблюдал Холстед с коллегами, когда в 1981 г. один из штаммов вируса лихорадки денге широко распространился на Кубе). Проблема заключалась в том, что было совсем не просто определить, кто из детей уже контактировал с вирусом, а кто нет. *Sanofi Pasteur* вакцинировала всех детей без разбора.

«Я возмущена до глубины души», — заявила Харрис. На многочисленных встречах и во время дискуссий она упрекала *Sanofi Pasteur* в том, что фирма не удосужилась собрать соответствующие данные. Вместо того чтобы проверить всех детей на наличие контакта с вирусом и лишь потом решать вопрос о вакцинации, фирма протестировала всего от 10 до 20% из них. Доктор У Супин (Su-Peung Ng), главный медицинский директор *Sanofi Pasteur*, объяснила свои действия невозможностью вести себя иначе на неизведанной обширной территории и ссылаясь на рутинную практику проведения других пробных вакцинаций.

Но что сделано — то сделано, дети были вакцинированы. *Sanofi Pasteur* ничего не оставалось, как совместно с исследователями из Питтсбургского университета разработать новый подход к тестированию уже привитых детей на инфицирование вирусом в прошлом.



Вакцинированные дети и их родители протестуют против реализации программы иммунизации, принятой на Филиппинах в 2016 г.

Преыдущие рекомендации *Sanofi Pasteur* относительно вакцинации базировались на результатах клинических испытаний с участием детей старшего возраста. С появлением новых данных возраст стал одним из ключевых факторов при решении вопроса о вакцинации. Девятилетние с гораздо большей вероятностью контактировали с вирусом, чем едва начавшие ходить, особенно если речь идет об эндемичных регионах, так что для них вакцина статистически безопасна. Но ни возраст, ни эндемичность не позволяют утверждать, что данный ребенок ранее не был инфицирован. Единственный способ установить его статус — сделать анализ крови.

Холстед делал все возможное, чтобы донести свои соображения до ВОЗ. В статье, опубликованной в одном из декабрьских номеров *Journal of Infectious Diseases*, он писал, что заявление консультативной группы при ВОЗ относительно вакцинации ошибочно. Согласно этому заявлению, вероятность госпитализации для детей, вакцинированных в возрасте от двух до пяти лет, достигает максимума через три года, а затем уменьшается до нуля. Холстед указал, что более долговременные наблюдения, проведенные *Sanofi Pasteur*, противоречат заявлению ВОЗ. Проанализировав результаты клинических испытаний, Антонио и Леонила Данс пришли к выводу, что никакого порогового возраста для безопасной вакцинации не существует.

Но ВОЗ по-прежнему настаивала на своем. «Наш обзор имеет всеобъемлющий транспарентный характер, — заявил Йохим Хомбах (Joachim Hombach), главный консультант отдела ВОЗ по иммунизации и вакцинам. — Разные суждения и рекомендации мы обсудим, но публикация 2016 г. отражает позицию консультативного комитета».

Противоречиям нет конца

В июле 2018 г. *Sanofi Pasteur* опубликовала выводы относительно повторного анализа результатов клинических испытаний с учетом питтсбургского тестирования, которые подтвердили данные о повышении риска тяжелого заболевания лихорадкой денге и частоты госпитализаций серонегативных детей, которым была сделана прививка. Авторы соглашались с тем, что вакцина в какой-то степени имитирует первичную инфекцию и повышает риск тяжелого заболевания при повторном заражении. Несмотря на то что сторонники ADE-феномена предсказывали такую ситуацию, в статье утверждалось, что «иммунопатогенетический механизм этого явления неизвестен».

Холстед заявляет, что сотрудники *Sanofi Pasteur* не принимают во внимание выводы, следующие из их собственных испытаний. У Супин парирует: все, что говорится относительно ADE, необходимо продемонстрировать на людях. «ADE — это скорее лабораторный эксперимент, наблюдение *in vitro*.

Мы не знаем, лежит ли этот феномен в основе того, что мы наблюдаем в реальности», — говорит она. Выводы относительно влияния лихорадки денге на здоровье нации не вызывают сомнения, с этим У Супин согласна. По данным *Sanofi Pasteur*, если дети девяти лет и старше, уже переболевшие лихорадкой денге, подвергаются вакцинации, то вероятность развития тяжелой формы лихорадки денге и частота госпитализации у них снижается. (По неизвестным причинам два приступа болезни, по-видимому, приводят к длительному иммунитету. Строго говоря, вакцина показана только тем, у кого был один приступ, а не два.)

У Супин не одинока в своем представлении, что ADE — не основной механизм развития тяжелой формы лихорадки денге. Дуэйн Габлер (Duane Gubler), заведующий отделом по проблемам, связанным с этим заболеванием, в Центрах по контролю распространения и предотвращению инфекционных заболеваний и почетный профессор Медицинской школы Дюкского университета и Национального университета Сингапура (*Duke-NUS*), заявляет, что исторически вспышки лихорадки денге в тяжелой форме связывали с DENV-2 и DENV-3, и штамм вируса не менее важен для течения болезни, чем ADE. В свою очередь, Алан Ротман (Alan Rothman), профессор клеточной и молекулярной биологии Род-Айлендского университета, заявляет, что Т-клетки, активирующие макрофаги и секретирующие вещества, которые вызывают воспалительную реакцию, принимают более непосредственное участие в развитии тяжелой формы лихорадки денге, чем антитела. Холстед со своей стороны считает, что Т-клетки играют положительную роль: они уничтожают инфицированных вирусом макрофагов.

На пути к более безопасной вакцине

С распространением лихорадки денге по всему земному шару и заражением ею миллиона людей необходимость в разработке более безопасной вакцины становится все более очевидной. Основываясь на новых данных, полученных *Sanofi Pasteur*, иммунологи заявляют, что они готовы пойти другим путем. «Мы будем выяснять у каждого участника испытаний, как он перенес первую инфекцию», — говорит Раджив Венкайя (Rajeev Venkaaya), президент глобальной группы по разработке вакцин фармацевтической компании *Takeda*. В настоящее время компания испытывает свою вакцину на детях в возрасте от четырех до десяти лет, проживающих в странах Латинской Америки и Азии. «Начиная испытания в 2016 г., мы осознавали всю важность этого вопроса, — говорит Венкайя. — Мы сделали все возможное для того, чтобы такие дети были включены в число испытуемых, и взяли пробы крови у 100% участников». В январе 2019 г. компания обнародовала предварительные результаты

клинических испытаний: вакцина эффективна. Что касается ее безопасности, то окончательные данные будут известны позже.

Появились по крайней мере еще две вакцины против лихорадки денге: одну разработали Национальные институты здравоохранения, другую — фирма *GlaxoSmithKline*. Но чтобы получить лицензию, их создателям придется подождать несколько лет. По словам Габлера, любая вакцина будет защищать от заражения двумя разновидностями вируса лихорадки денге, но не от всех других. «И что нам делать: использовать то, что есть, или ждать еще 50 лет, пока появится универсальная вакцина?» — вопрошает Габлер. Холстед настроен более оптимистично. Он считает, что уже сейчас мы имеем действительно хорошую вакцину — продукт Национальных институтов здравоохранения, доказавший эффективность в ходе доклинических испытаний и безопасность для человека. Конечно, настоящих клинических испытаний никто не отменял и нужно дождаться их результатов.

Заявление FDA от октября 2018 г. о безотлагательной проверке всех сведений о *Dengvaxia* еще более обострило дискуссию. США интересуют положение дел с лихорадкой денге в таких регионах, как Гуам, Виргинские острова, Самоа и Пуэрто-Рико. Габлер предложил проводить вакцинацию в последнем из перечисленных мест, где выживаемость гораздо выше, чем на Филиппинах. «Я склонен использовать вакцину в высокоэндемичных регионах без предварительного тестирования, полагая, что при высокой выживаемости и налаженном менеджменте риск ADE минимален», — говорит он.

Холстед возражает: «Продукт нельзя считать безопасным, если его применили только в случае заведомо серопозитивных индивидов». Но чтобы доказать наличие первичной инфекции, нужно провести тестирование в лабораторных условиях, что не всегда осуществимо во многих регионах, где бушует эпидемия. В ответ на это ВОЗ в сентябре 2018 г. заявила, что если тестирование невозможно, имеет смысл провести вакцинацию детей старше девяти лет в регионах с эндемичностью 80% и выше. Когда Хомбаха спросили, что он думает об этичности такой рекомендации, он ответил, что ВОЗ взвесила все за и против, и добавил: «Такая кампания должна сопровождаться раскрытием информации о риске вакцинации для лиц с неустановленным серологическим статусом». Конечно, информирование населения о всех нюансах подобных мероприятий — при том что многие люди просто не понимают смысла медицинских терминов — трудная задача. Сотрудница *Sanofi Pasteur* Карен Батусингх (Karen Batoosingh) заявляет, что «вакцина должна быть доступна всем, кто уже перенес заболевание, и компания прилагает все усилия к тому чтобы ускорить тестирование и охватить как можно больше людей».

Утрата доверия

Отношение к программе вакцинации остается неоднозначным. Выступая в сенате, Акино заявил, что заболеваемость лихорадкой денге на Филиппинах растет с угрожающей быстротой, но выразил надежду, что вакцинация предотвратит распространение инфекции на города. Однако в феврале обе палаты парламента выступили с заявлением, согласно которому Акино, Гарин и другие должностные лица несут ответственность за нерегулярность поставок вакцины и непроведение соответствующих мероприятий. Семьи многих умерших детей подали в суд на Гарин и других филиппинских администраторов, обвинив их в непреднамеренном убийстве детей и причинении им страданий. (Когда был задан вопрос об обстоятельствах, при которых началась реализация программы вакцинации, Энрике Доминго (Enrique Domingo), заместитель секретаря Министерства здравоохранения, заявил, что он вступил в должность в декабре 2017 г., когда программа уже действовала, и был не в курсе дела.)

На фоне страхов и худших ожиданий в разных частях Филиппин возникали вспышки лихорадки денге. В феврале власти сообщили о 8,4 тыс. заболевших и более 130 умерших. Родители были слишком сильно напуганы, чтобы в этих условиях соглашаться на вакцинацию детей. По данным проекта *Vaccine Confidence*, в 2018 г. лишь треть филиппинцев считала вакцинацию полезной; в 2015 г. таких было более 93%. В статье, опубликованной в журнале *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, Хейди Ларсон (Heidi Larson), руководитель проекта, заявила, что «в результате шумихи в медицинских кругах и искажения фактов с целью дискредитации властей, исследователей и менеджеров, а также затребования конгрессом и сенатом многочисленных документов и отчетов» среди населения возникли паника и недоверие к вакцинам. Холстед и другие указали на несколько фактов, обусловивших перемену настроения в обществе, в частности на необоснованное заверение *Sanofi* в безопасности *Dengvaxia*: «К утрате доверия привело грубое нарушение закона, а не реальная ситуация с вакциной».

На вопрос нашего журнала, можно ли было что-то противопоставить тем, кто выступал против вакцинации, Холстед ответил, что в 1990-х гг. им был создан фонд *Children's Vaccine Initiative*, позже преобразованный в глобальное партнерство, занимающееся внедрением вакцинации в странах третьего мира. «Я делал все возможное и невозможное для поддержки разработчиков вакцин и вакцинации», — сказал он.

По словам Антонио Данса, даже после того, как буря в медицинских кругах утихла и был выработан некий консенсус, родители филиппинских детей продолжали жить в состоянии стресса. «Был

ли мой ребенок серонегативным до вакцинации? Если он начал кашлять, нужно ли срочно везти его в больницу? Если у него субфебрильная температура, можно ли отправлять его в школу?» А как отследить состояние здоровья миллиона детей и выяснить, заболел ли кто-либо из них лихорадкой денге? Если кто-то из вакцинированных детей умирал, почти всегда смерть связывали с лихорадкой денге, хотя это не соответствовало действительности. «Печально, что масла в огонь подливала ВОЗ», — говорит Данс.

Холстед обеспокоен тем, что при снижении уровня антител во времени до величины, когда *ADE* особенно вероятен, у детей возрастает предрасположенность к развитию лихорадки в тяжелой форме при реальном заражении. Основываясь на результатах клинических испытаний *Sanofi Pasteur*, согласно которым пятеро из каждой тысячи серонегативных вакцинированных детей были госпитализированы, он подсчитал, что на Филиппинах в больницу попадут более 4 тыс. таких детей. Холстед возмутился: «Почему же *Sanofi* не задалась вопросом, как защитить всех вакцинированных детей (у которых теперь возник риск развития *ADE*)?» У Супин ответила, что не было никакой ясности в том, что тяжелая форма — это следствие вакцинации, а не *ADE*. Всех пациентов независимо от того, перенесли они раньше инфекцию или нет, были ли они вакцинированы, необходимо защитить от укусов комаров; за ними нужно постоянно наблюдать, чтобы выявить первые признаки болезни и принять неотложные меры. На вопрос о том, когда будут опубликованы окончательные результаты клинических испытаний, *Sanofi Pasteur* сообщила, что они размещены на сайте Американского общества тропической медицины в конце 2018 г.

Вакцины спасли бесчисленное число жизней. Благодаря им натуральная оспа исчезла с лица земли, почти полностью искоренен полиомиелит, столбняк и бешенство уже не наводят ужас. И несмотря на это, недоверие к вакцинам только растет — и объясняется прежде всего неинформированностью населения.

Перипетии с вакцинацией против лихорадки денге подняли один непростой вопрос: как вести себя фармацевтическим компаниям и менеджерам в условиях постоянного поступления новой информации и несовершенства вакцин? Этично ли подвергать риску меньшинство в интересах большинства, о чем шла речь на консультативном совете ВОЗ в сентябре 2018 г.? Кто должен решать этот сложный вопрос: международная группа экспертов, органы здравоохранения, обладающие всей полнотой информации, родители или все эти категории вместе? И кто понесет ответственность, если что-то пойдет не так? ■

Перевод: Н.Н. Шафрановская



ЛУЧШИЕ РАБОТЫ
ПРОИЛЛЮСТРИРУЮТ
СТАТЬИ ВИКИПЕДИИ

ВЫИГРЫВАЙ
ЦЕННЫЕ
ПРИЗЫ

ФОТО
КОНКУРС

СНИМАЙ
НАУКУ!

УЧАСТВУЙ
И ОТКРЫВАЙ
МИР НАУКИ

УВЕЛИЧЕННОЕ
ИЗОБРАЖЕНИЕ
КРИСТАЛЛА
КВАРЦА

РАЗМЕР
1,5X0,85 MM

НА ПОВЕРХНОСТИ ХОРОШО
ВИДНЫ ОТПЕЧАТКИ И МЕЛКИЕ
НАРОСШИЕ КРИСТАЛЛЫ
КРОКОИТА

12+

ПОДРОБНОСТИ НА САЙТЕ
NAUKATV.RU

Реклама

ЦТ

ПОЗНАНИЕ



МОЯ ПЛАНЕТА
ТЕЛЕКАНАЛ



НАУКА
ТЕЛЕКАНАЛ



ЖИВАЯ ПЛАНЕТА
ТЕЛЕКАНАЛ



ПЛАНЕТА HD
ТЕЛЕКАНАЛ



ИСТОРИЯ
ТЕЛЕКАНАЛ



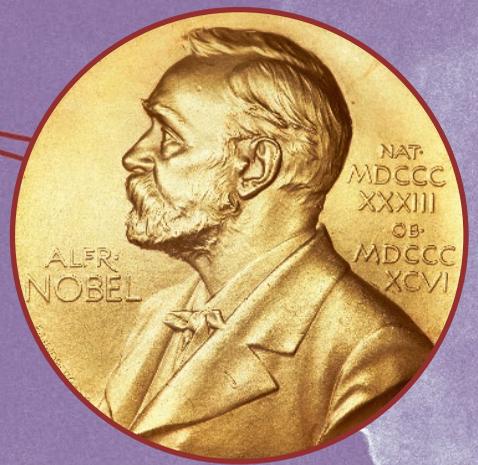
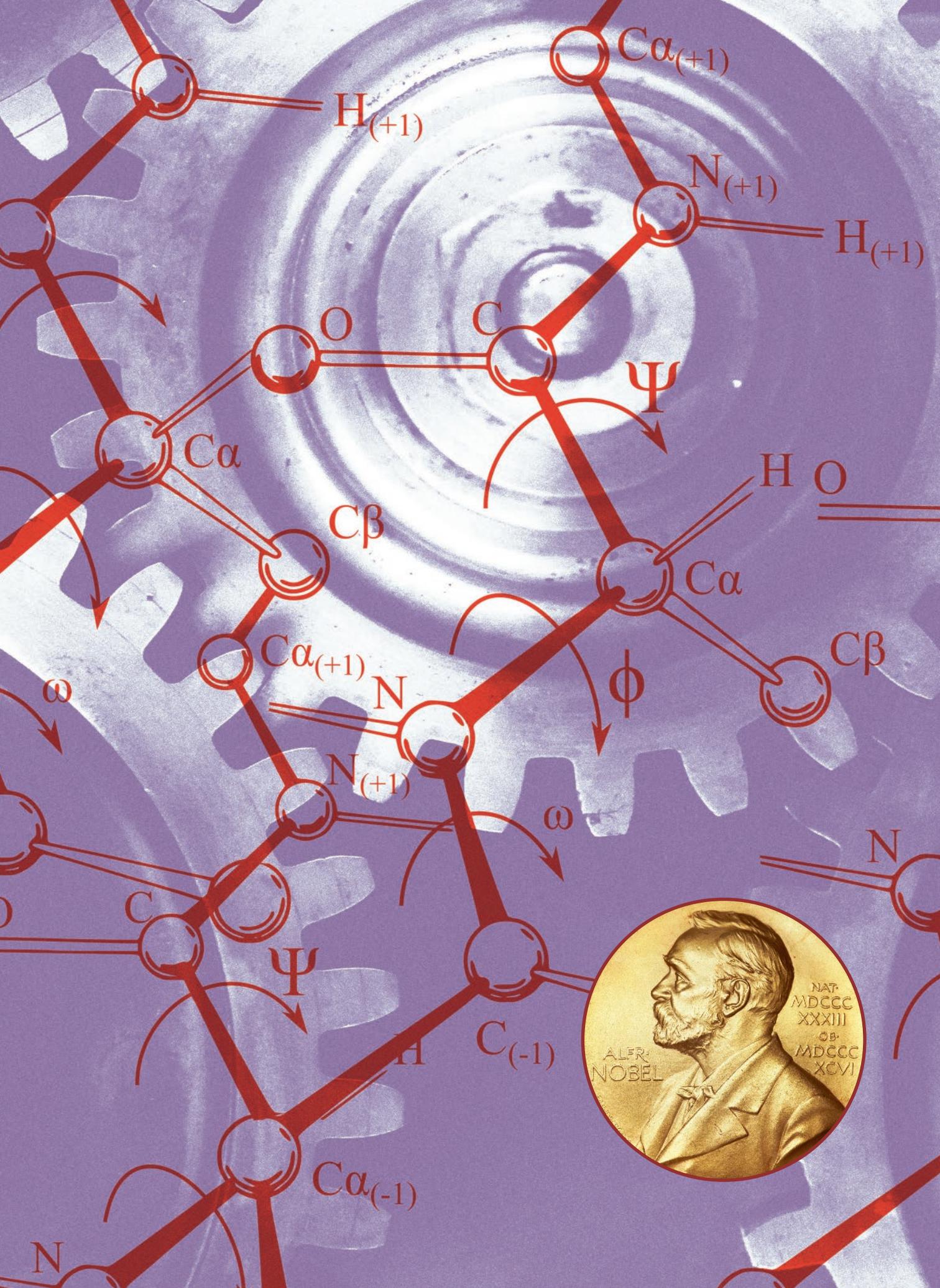
ДОКТОР
ТЕЛЕКАНАЛ



ТЕЛЕКАНАЛ

МИР МОЛЕКУЛЯРНЫХ МАШИН

Ряды иностранных членов Российской академии наук пополнились выдающимся французским ученым. На общем собрании членов РАН, прошедшем в конце апреля этого года, диплом иностранного члена РАН был вручен лауреату Нобелевской премии за 2016 г. **Жан-Пьеру Соважу**, признанному лидеру в области супрамолекулярной химии и дизайна молекулярных машин, действительному члену Французской академии наук, профессору Страсбургского университета.



Ученый рассказал корреспонденту нашего журнала о том, что представляет собой предмет его исследований.

В беседе принимала участие и одновременно переводила гостя на русский язык его российская коллега член-корреспондент РАН **Юлия Германовна Горбунова**, за что мы выражаем ей искреннюю признательность.



Лауреат Нобелевской премии за 2016 г.
Жан-Пьер Соваж

— Мсье Соваж, почему вы стали заниматься химией? Чем вас привлекла эта наука?

— Когда мне было лет 15–16, я жил в деревенской местности. Я очень интересовался растениями, цветами. И когда я начал в школе изучать химию, создал в подвале нашего дома маленькую лабораторию, очень примитивную. И я занимался тем, что экстрагировал красители из цветов, получал хлорофилл. Это было начало...

— Каким был ваш путь в науке? Вы сразу нашли свою тему или шли к ней постепенно?

— Это была не первая моя тематика. В моей группе мы занимались превращением солнечной энергии в химическую. Реакция, которая всегда очень интересовала химиков и интересует их и сегодня, — это расщепление воды на водород и кислород. Подобрав эффективную фотокаталитическую систему, можно получить водород из воды под воздействием света.

Мы работали с фотоактивными координационными соединениями с азотсодержащими лигандами (фенантролином, бипиридином), и нам пришла идея, как с помощью комплексообразования получить молекулы, которые могут иметь сложную структуру (топологию), то есть могут быть сцеплены, как олимпийские кольца, друг с другом. И это совершенно разные области исследований, они не имеют ничего общего друг с другом. Но эта идея нам показалась очень увлекательной, и поэтому мы решили переключиться с одной тематики на другую. Вообще, я думаю, что это очень важно и перспективно для ученых — не бояться рисковать в науке и переходить в другие, еще никем не исследованные области. Мы начали работать над молекулярным дизайном этих механически сцепленных колец. И когда мы начинали, это была совсем неизвестная область, это было начало новой дисциплины, которую назвали молекулярной топологией. Наряду со сложной топологией особенностью этих систем — их подвижность. В моей группе, параллельно с коллегами из других групп и стран, мы начали синтезировать молекулярные моторы, роторы, узлы и молекулярные машины.

Сама природа — грандиозный источник вдохновения для химиков. Молекулярные моторы, молекулярные машины существуют везде в живом мире. И в настоящий момент в нашем организме действуют миллионы машин, которые весьма быстро

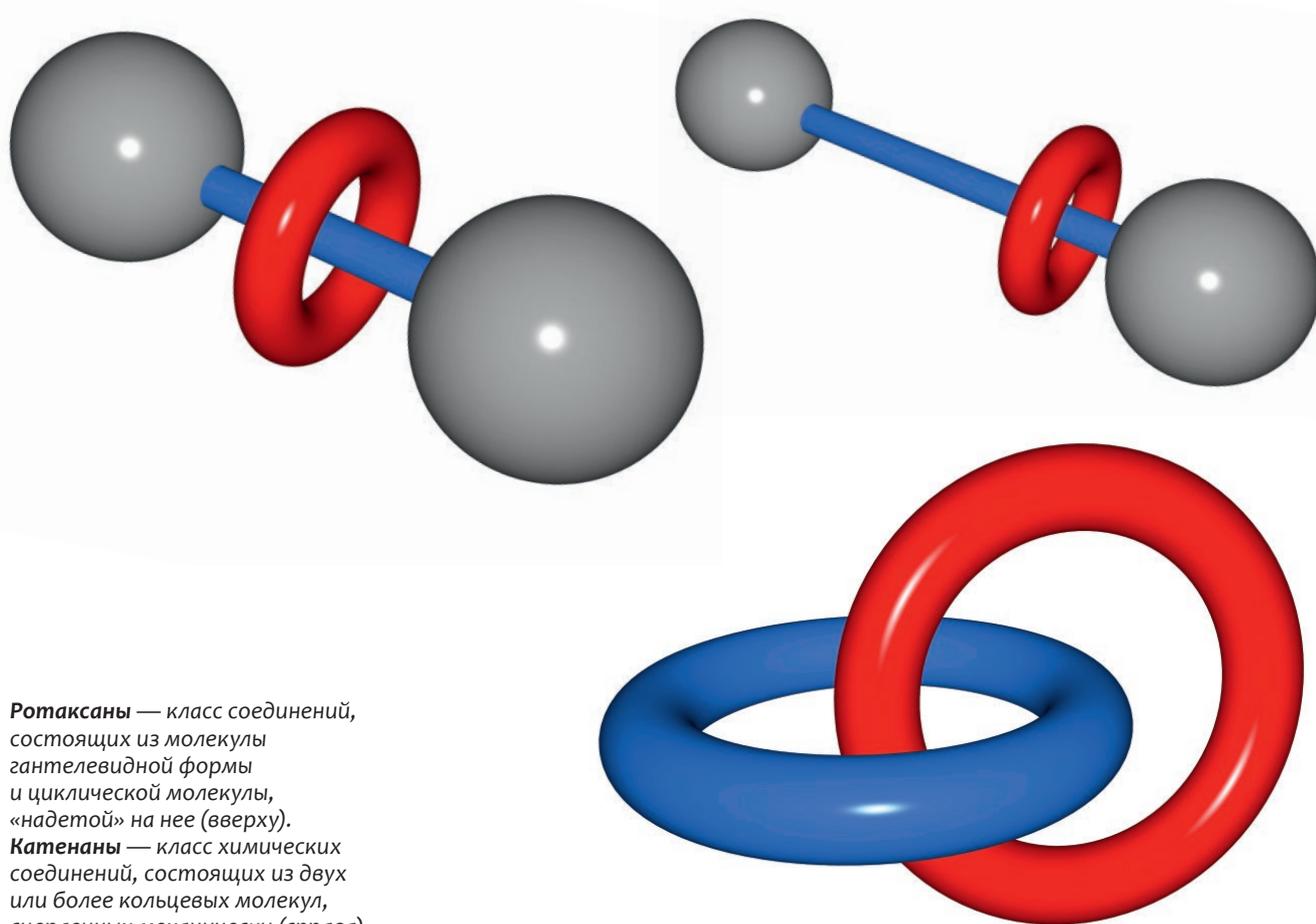
двигаются. Мы очень вдохновились этим. Вместе с коллегами из других групп мы сделали молекулярные моторы — например, линейные молекулярные шаттлы, в которых двигается стержень внутри цилиндра, такие вращающиеся роторы, молекулы, которые могут сокращаться и увеличиваться, как наши мускулы, молекулярные компрессоры и другие системы движения. Однако эти соединения синтетические, в природе точно таких не существует.

— **А с какими веществами вы работали? Я слышала такие названия: катенаны и ротаксаны. Что это такое? Это синтетические вещества? И еще я прочитала, что это было в 1960–1970-е гг., но тогда ведь не было такой аппаратуры, которая могла бы работать с наномиром.**

— Я сейчас говорю о работах, которые начались в моей группе в 1980-х гг. А первые катенаны действительно были сделаны в 1963–1964 гг. И в то время в Европе уже была хорошая аппаратура. Эксперимент занимал больше времени, но все эти процессы уже можно было контролировать.

— **А по какому принципу были выбраны эти вещества? Какими они должны были обладать свойствами?**

— Катенаны представляют собой несколько колец, механически скрепленных друг с другом, а ротаксаны состоят из двух частей — гантелевидной молекулы и кольца-макроцикла с двумя объемными группами (стопперами) на концах гантели для предотвращения слетания макроцикла. В отличие от классических систем, построенных из отдельных молекулярных компонентов, катенаны и ротаксаны не могут диссоциировать на отдельные фрагменты. В случае катенанов этому препятствует механическое зацепление макроциклических фрагментов; в случае ротаксанов диссоциация невозможна из-за стерических препятствий, оказываемых объемными концевыми группами-стопперами. Отсутствие ковалентных связей между молекулярными компонентами приводит к тому, что такие ансамбли характеризуются высокой степенью подвижности каждого из фрагментов, и в зависимости от различных



Ротаксаны — класс соединений, состоящих из молекулы гантелевидной формы и циклической молекулы, «надетой» на нее (вверху).

Катенаны — класс химических соединений, состоящих из двух или более кольцевых молекул, сцепленных механически (справа).

факторов (полярности растворителя, кислотности среды, фото- или электрохимического воздействия и т.д.) система может менять свою архитектуру. Таким образом, эти соединения представляют собой наиболее перспективные компоненты для создания молекулярных машин. Я могу нарисовать примеры на вашем листочке. *(Рисует.)*

— **Это выглядит как цепочка.**

— Да, а у ротаксана есть кольцо, через которое протернута как бы штанга. И у этих молекул особенные свойства.

— **Нобелевская премия была вам вручена в 2016 г. за дизайн и синтез молекулярных машин. Когда я прочитала об этом, подумала, что это немного похоже на то, как если бы Создателю вручили премию «за синтез и дизайн человека». Человек ведь тоже в каком-то смысле молекулярная машина?**

— Наши молекулярные машины очень очень простые по сравнению с тем, что происходит в организме у человека. На самом деле мы вдохновляемся природой, тем, что в ней происходит. И, вдохновляясь этим, мы пытаемся делать что-то подобное тому, что происходит в живой природе. Мы пока еще далеки от того, чтобы создавать, как природа, но мы находимся на пути понимания того, что происходит в природе. И это

наша основная задача. Если мы научимся понимать, как природа устроила многие сложные вещи, это позволит нам решить очень важные задачи...

— **Какие возможности для человека открываются в связи с вашими исследованиями и открытиями?**

— Мы, конечно, далеки от того, что делает природа, но исследования, которые мы проводим, могут помочь в создании принципиально новых умных материалов, например синтетических ферментов для будущего. Я в это очень верю. В настоящий момент уже есть одно коммерческое применение ротаксанов — в производстве новых материалов. Коллеги-ученые из Японии и Кореи делают пленки на их основе. Эти пленки очень гибкие, подвижные, ими покрывают поверхности, которые должны быть защищены от царапин. Как только появляется царапина, она как бы сама себя заживает. Эти пленки используются для покрытия мобильных телефонов, различных дисплеев. Это первое коммерческое применение ротаксанов.

— **Насколько я знаю, ваше открытие может найти применение и в молекулярной медицине, в частности при борьбе с раком. Молекулярные машины смогут доставлять препарат прямо в опухоль.**



Нобелевские лауреаты 2016 г., Жан-Пьер Соваж — третий справа. Фото: Бенгт Найман.

— Да, и это, наверное, самое важное. Адресная доставка лекарства, скорее всего, будет одним из важнейших достоинств этого открытия и одним из главных его применений. Принцип действия такой: вы берете некий носитель и программируете его свойства так, чтобы он доставлял нужное лекарство в больную клетку. Попадая туда, он выбрасывает это лекарство, и оно начинает действовать строго в той клетке, в которую оно внедрено. Два года назад была опубликована удивительная работа американских авторов. В ней описано, как они взяли достаточно большую молекулу и доставили близко к клетке. В отсутствие света (излучения определенной длины волны) она не работает, и только когда свет включен, она начинает вращаться, как дрель, которая делает дырку в клетке для того, чтобы туда что-то впрыснуть, какое-то лекарство.

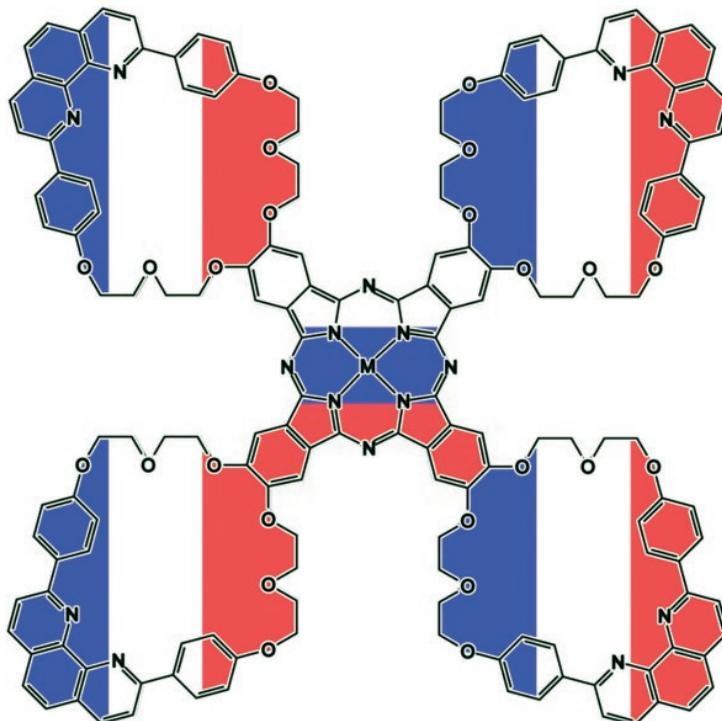
— **Фантастика. Как, по вашему мнению, будет дальше развиваться химия? Считаете ли вы, что путь развития науки — это междисциплинарность?**

— Сейчас очень важно делать именно междисциплинарные проекты. Сложно предсказать, что будет основным направлением науки, но я верю, что химия и биология будут оставаться одними из самых важных областей. Я не противник генетически модифицированных организмов. Уверен, что за ними будущее.

— **В 2016 г. вы вместе с другими нобелевскими лауреатами подписали открытое письмо с призывом к Greenpeace, ООН и правительствам всего мира прекратить борьбу с генетически модифицированными организмами. Чем оно было вызвано?**

— Никто до сих пор не продемонстрировал, что генетически модифицированные организмы вредные, токсичные. Нет такого доказательства. Но люди, как правило, не очень научно образованные критикуют эту область. Это грустно. Например, генетически модифицированный рис, так называемый золотой рис, может сохранять четыре или пять недель, покрытый водой, и не гибнуть, в то время как обычный рис, не модифицированный, погибает в таких условиях за один-два дня. И вот наличие такого генно-модифицированного золотого риса спасло огромное количество людей в Бангладеш от голода. Это только один пример, но есть очень много других.

— **Сейчас много «страшилок» циркулирует в средствах массовой информации.**



«Российско-французская молекула», один из совместных проектов российских и французских химиков в лаборатории Соважа

Например, такая: когда хоронят современных людей, их тела не разлагаются, потому что они все пропитаны химическими соединениями, которые не распадаются.

— Ваше тело, когда вы родились, состоит из химии, из молекул. Человек — очень интенсивная, наполненная химическая система. Наш организм — это химический завод. Даже маленькая бактерия — это завод, большой химический завод, потому что там идут химические процессы.

Ответ единственный: проблема в том, что люди в целом не очень образованы и у них крайне мало информации. Они просто не хотят ее знать. И наша задача как ученых — прийти к обычным людям и рассказать, чем мы занимаемся, почему это важно, кто и что из чего состоит. Вы, например, знаете, что состоите из 22 типов химических элементов? Так вот, наша задача — моя и моих коллег — рассказать людям об этом и многом другом. Тогда необоснованные страхи будут ликвидированы.

— **Я очень надеюсь, что состоявшееся интервью будет этому способствовать. Спасибо большое!** ■

Беседовала Ольга Беленицкая



Юлия Германовна Горбунова, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН и Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН:

— Создание материалов, свойствами которых можно обратимо управлять с помощью внешних воздействий, — весьма актуальная задача. Еще в 1959 г. американский физик, нобелевский лауреат Ричард Фейнман в своей рождественской лекции «Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики» говорил: «Мне хочется обсудить одну малоизученную область физики, которая представляется весьма важной и перспективной и может найти множество ценных технических применений. Речь идет о проблеме контроля и управления строением вещества в интервале очень малых размеров. <...> Когда-нибудь (например, в 2000 г.) люди будут удивляться тому, что до 1960 г. никто не относился серьезно к исследованиям этого мира <...>. Представьте себе возможности, которые откроются в случае изготовления микроскопических объектов, способных выполнять механические действия! В сущности, производство таких сверхмалых объектов может быть коммерчески интересным».

Очень многие из предсказаний этой лекции сбылись: миниатюризация всей современной электроники, прецизионная литография в твердотельной электронике и микроэлектронике, создание сверхчувствительных сенсоров, молекулярных переключателей, фотохромных материалов, преобразователей света, которые прочно вошли в нашу жизнь. И даже предсказанное Фейнманом управление на атомарном уровне было реализовано с созданием сканирующего туннельного микроскопа с атомным разрешением. Такой инструмент позволяет не только анализировать образцы с ранее недоступным разрешением, но даже управлять передвижением отдельных атомов. Так, в 1989 г. Дон Эйглер выложил логотип *IBM* из 35 атомов ксенона на поверхности монокристаллического никеля. В 2012 г. ученые *IBM* показали мультипликационный фильм «Мальчик и его атом», основанный на анимации 65 молекул монооксида углерода на медной подложке.

В то же время биологи, заинтересованные в движении в сложных биологических системах, инициировали изучение биологических машин живых организмов. Отдельные молекулы или их

ансамбли играют основополагающую роль в динамике движения и функционирования биологических систем. Эти исследования и побудили химиков и материаловедов задуматься над дизайном искусственных молекулярных устройств и переключателей. Сегодня разработано большое количество таких молекулярных устройств на основе разнообразных классов химических соединений, управляемых при помощи внешних воздействий различной природы (света, кислотности или температуры среды, электрохимических превращений и т.д.). Фото- и электрохромные, магнитные, сенсорные переключатели уже прочно вошли в нашу жизнь.

А вот молекулярные машины (как разновидность переключателей, которые могут совершать механическое движение дискретных молекулярных компонентов относительно друг друга под воздействием внешних факторов) все еще остаются непознанной до конца наукой — но за ней, безусловно, будущее! О высоком уровне актуальности данной тематики свидетельствует Нобелевская премия по химии за 2016 г., присужденная Жан-Пьеру Соважу, Джеймсу Стодарту и Бернарду Феринге «за проектирование и синтез молекулярных машин».

Группы этих трех исследователей заложили принципы так называемого молекулярного дизайна химических систем, в которых возможна реализация идеи механического движения наноскопических объектов. Какая же энергия заставляет молекулярную машину двигаться? С точки зрения внешнего воздействия это могут быть химические (кислотность среды и ее полярность, введение катионов и т.д.), электрохимические и фотохимические источники энергии. Последние представляются наиболее перспективными как безотходные и простые в реализации. Кроме того, для создания оптимальной молекулярной машины необходима реализация трех принципов: система должна быть обратима, движение должно находиться под контролем и быть направленным.

За последние несколько десятков лет синтезированы молекулярные роторы, шаттлы, мускулы,

турникеты и другие молекулярные устройства. Группой профессора Бернарда Феринги разрабатываются молекулярные моторы, вращение которых осуществляется под воздействием света определенной длины волны, что положено в основу создания новых типов каталитических систем, «умных» материалов, систем для адресной доставки лекарств. Этот же принцип был положен в основу создания первого примера четырехколесной наномашин, передвигающейся по поверхности золота. Пришивая разработанных молекулярных устройств к поверхности позволит разрабатывать принципиально новые типы материалов с настраиваемыми смачиваемостью, агрегацией, варьируемыми оптическими и каталитическими свойствами, а также систем для адресной доставки лекарств, самовосстанавливающихся материалов и т.д.

В России эта тематика активно развивается в научных школах академиков А.Ю. Цивадзе, М.В. Алфимова и члена-корреспондента РАН С.П. Громова, академиков В.И. Минкина, И.П. Белецкой, А.И. Коновалова и члена-корреспондента РАН И.С. Антипина, академика С.М. Алдошина. В научной школе академика И.Л. Еременко впервые показана принципиальная возможность создания магнитоуправляемой молекулярной машины.

Приведу слова Нобелевского комитета по поводу премии по химии за 2016 г.: «С точки зрения развития науки молекулярные двигатели сейчас на том же этапе, что и электрический двигатель в 1830-е гг. Тогда ученые показали работу кривошипных механизмов и колец, не зная, что это приведет к созданию поездов, стиральных машин, вентиляторов и кухонных комбайнов».

Мы познакомились с Жан-Пьером в 2005 г. во время подписания соглашения о создании европейской лаборатории под названием «Супрамолекулярные системы в химии и биологии». Инициатором образования этого сообщества с французской стороны был профессор Страсбургского университета Александр Варнек, а с российской стороны — академики А.Ю. Цивадзе, А.И. Коновалов, М.В. Алфимов. Лабораторию возглавил выдающийся ученый, лауреат Нобелевской премии Жан-Мари Лен — создатель супрамолекулярной химии и одновременно учитель Жан-Пьера Соважа. Интересно, что Жан-Мари Лен получил Нобелевскую премию за криптанды, которые впервые были синтезированы при выполнении диссертационной работы Жан-Пьера Соважа. Поэтому я часто говорю молодежи: «Если вы работаете с настоящими учеными, не бойтесь, что какие-то ваши работы войдут в премию ваших учителей. Работая и обучаясь у настоящих ученых, вы обязательно получите свои премии». История Соважа это подтверждает.

Возвращаясь к консорциуму: в него входило около 30 лабораторий из Франции, приблизительно столько же — из России. Мы ежегодно проводили

конференцию и международную школу по супрамолекулярной химии и биологии для молодых ученых. На этих встречах мы знакомились, рассказывали друг другу о проектах и работах. В результате все лаборатории нашли пересечения. Мы начали работать с Жан-Пьером в 2007 г. Наш молодой и очень талантливый сотрудник А.Г. Мартынов поехал в лабораторию Соважа и начал работать над проектом, который мы назвали «Российско-французская молекула». Нам очень повезло, что мы начали это сотрудничество, — ведь было чему поучиться и в науке, и в жизни! Жан-Пьер — удивительный ученый, человек с большой буквы. Для него все равны начиная со студента и заканчивая мэром Страсбурга, где он работает. Будучи нобелевским лауреатом, он никогда не боится сказать: «Я не понимаю, объясните мне», если он не разбирается в вопросе. Этому тоже, мне кажется, надо учить детей, чтобы они не боялись задавать вопросы, не боялись выглядеть глупыми. И зачастую они задают такие вопросы, которые нас наталкивают на поиск новых, нестандартных решений.

В ходе выполнения работ по проекту с Жан-Пьером Соважем нами была разработана оригинальная стратегия получения молекул на основе фталоцианинов (синтетических аналогов хлорофилла), интегрированных с фенантролинсодержащими макроциклами для направленного получения новых молекулярных машин с топологической катенанов и ротаксанов. И главное — мы начали развивать это новое направление (дизайн молекулярных машин и переключателей) в нашей научной группе, что в большой степени проводится под руководством А.Г. Мартынова.

Ж.-П. Соваж — очень живой человек, разносторонний, любит искусство, музыку. Когда мы собираемся в компании, он может спеть. У него удивительная супруга, Кармен, которая сопровождает его во всех поездках. Они любят танцевать, когда бывают какие-то мероприятия.

Однажды мы с ним обсуждали политические темы, и он сказал, что ученые должны быть проповедниками мира и различных культур среди народов разных стран и всех слоев населения. А дальше он произнес такие слова... я никогда об этом не задумывалась, но потом поняла, что он абсолютно прав. Он сказал, что политики должны озвучивать мнение своей страны, это их обязанность. Бизнесмены, которые много ездят по миру и знают разные культуры, не могут высказываться, потому что им есть что терять — деньги и бизнес. И только ученые — единственная категория людей, которые, с одной стороны, ездят по миру и очень хорошо представляют разнообразие традиций, народов, но, с другой стороны, при этом им терять нечего, поэтому они одни могут правдиво нести свое видение мира. В этом плане у ученых есть миссия осуществлять обмен взглядами и мнениями. ■



БИОЛОГИЯ

Новые данные о механизме образования

петель в геномной ДНК свидетельствуют об их

участии в регуляции активности генов

Эрез Либерман Эйден

ОБ АВТОРЕ

Эрез Либерман Эйден (Erez Lieberman Aiden) возглавляет Центр по изучению архитектуры генома при Медицинском колледже Бэйлора и Университете Райса.



М

не трудно соотнести размер человеческого генома с чем бы то ни было, поэтому я предпочитаю представлять его увеличенным в 1 млн раз. В таком масштабе молекулы ДНК — хромосомы — напоминают лапшу. Если сложить конец в конец ДНК всех увеличенных в 10^6 раз 46 хромосом человека, составляющих его геном, то вы получите структуру, равную по длине расстоянию от Нью-Йорка до Канзас-Сити. Но чтобы уместиться в клеточном ядре, тоже увеличенном в миллион раз, такая гигантская молекула должна каким-то образом сложиться. 46 хромосом содержат два набора из примерно 20 тыс. генов. Каждый из них посылает клетке закодированную инструкцию о том, какой белок она должна синтезировать. Отметим, что в масштабе 1 : 1 000 000 ген сравним по длине с автомобилем.

Проникнув взглядом в клеточное ядро, мы увидим, что ДНК образует множество петель. Лет десять назад, будучи студентом, я часто ел за обедом рамен и уже тогда задумывался над тем, как геномная ДНК не перепутывается, подобно лапше в этом корейском блюде. В 2014 г. мы с коллегами немного приблизились к ответу на данный вопрос, присоединившись к мнению тех, кто считал упаковку ДНК в клеточном ядре процессом далеко не случайным. Моя группа из Бейлорского медицинского колледжа в составе студентов Сухаса Рао (Suhas Rao), Мириам Хантли (Miriam Huntley) и Адриана Санборна (Adrian Sanborn) показала, что геномная ДНК человека образует при упаковке примерно 10 тыс. петель, подчиняясь некоему коду, заложенному в нуклеотидной последовательности самой ДНК. Закономерность формирования

петель уходит своими корнями в глубокую древность. Многие такие же петли есть у геномной ДНК мышей, и унаследованы они от древних видов животных, обитавших на Земле более 60 млн лет назад. Такая преемственность предполагает, что петли играют важную роль в выживании видов.

Вероятнее всего, они причастны к регуляции экспрессии генов. Все клетки любого организма имеют одинаковый набор генов, но если бы их активность была одинакова в клетках разных тканей, никакой организм не мог бы существовать: клетки сердечной мышцы ничем не отличались бы от клеток головного мозга и т.д. Как достигается удивительная гармония в геномной активности — загадка. Согласно новейшим данным, один из участников процесса гармонизации — эти самые петли.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Автор с коллегами показал, что *in vivo* геномная ДНК человека образует примерно 10 тыс. петель. Аналогичные петли присутствуют в ДНК мышей и других животных.
- Недавно группа исследователей выяснила, как эти петли образуются. Ключевое место в данном процессе принадлежит некоей биологической машине, аналогичной устройству, подгоняющему длину веревочных лямок рюкзака-мешочка.
- Петли могут играть определенную роль в регуляции активности генов, хотя новейшие данные указывают на то, что это не их основная функция.

Исследуя структуру и свойства петель, мы надеемся лучше понять механизм регуляции активности генов и природу многих заболеваний. Недавно было установлено, как петли образуются и не допускают перепутывания молекул ДНК.

Facebook для ДНК

Мои размышления по поводу перепутанной ДНК привели к еще более серьезному вопросу: каким образом 3D-упаковка этой макромолекулы в клеточном ядре сказывается на активности генов? С конца 1970-х гг. стало появляться все больше свидетельств того, что активацию гена опосредует небольшой сегмент ДНК, названный энхансером. Позже выяснилось, что этот сегмент располагается вблизи гена, к регуляции активности которого он причастен. Чтобы перевести переключатель — сегмент ДНК под названием «промотор», примыкающий к целевому гену, — в положение «вкл», молекула ДНК должна образовать петлю, так чтобы энхансер вступил в контакт с промотором. Я занялся этой проблемой и видел только один способ решения: найти все петли в молекуле ДНК.

Концептуально план действий не представлялся сложным. Предположим, что два человека встречаются друг с другом и обмениваются рукопожатием заметно чаще, чем все остальные. Логично предположить, что это — хорошие знакомые. Аналогично, если два сегмента ДНК (локусы), расположенные вдоль хромосомы не слишком близко, контактируют особенно часто, значит молекула ДНК должна изогнуться — иначе никакого контакта не случится. Нам нужно было определить, как часто сегменты геномной ДНК взаимодействуют друг с другом: создать что-то подобное социальной сети.

Для того чтобы реализовать наш план, мы адаптировали метод, описанный в 1993 г. Кэтрин Каллен (Katherine Cullen), работавшей в Университете Вандербильта. В то время структуру генома как только ни представляли! В общем и целом это была переменчивая система, ни минуты не находящаяся в покое. Такую переменчивость Каллен и взяла на вооружение. Если хромосома пребывает в постоянном движении, значит разные сегменты геномной ДНК наталкиваются друг на друга. Те из них, которые соседствуют в трехмерном пространстве, встречаются друг с другом чаще, чем разнесенные на большие расстояния. Определив частоту таких встреч, можно выяснить, какие сегменты генома близки друг к другу в 3D-измерении.

Для того чтобы достичь поставленной цели, Каллен с коллегами разработали метод, названный ими «анализ ядерного лигирования» (*nuclear ligation assay, NLA*). Он состоит в следующем. Вы берете клетки и, не разрушая ядер, стабилизируете их геном. Затем ферментативным путем разрезаете ДНК на мелкие кусочки и с помощью некоего

белка сшиваете конец в конец (процесс называется лигированием) соседние сегменты, в результате чего получается одна длинная полинуклеотидная цепочка. И, наконец, секвенируете набор сшитых фрагментов. Если, просматривая клетки одну за другой, вы видите, что два сегмента ДНК, не соседствующие в полинуклеотидной цепи, во всех случаях близко контактируют, значит при укладке молекулы в клеточном ядре они часто сближаются.

Исследования, проведенные Каллен, результаты которых представлены в статье, опубликованной в *Science*, показывают, что два участка ДНК, обрамляющие некий специфический протяженный сегмент, контактируют друг с другом гораздо чаще, чем если бы это происходило случайным образом. Значит, данный сегмент изгибается и образует петлю.

Для того чтобы оценить частоту контактирования друг с другом разных сегментов ДНК, нужно построить сеть, аналогичную Facebook, но только для генома

В далеком 1993 г. проводить эксперименты с использованием метода *NLA* было затруднительно. К счастью, в то время, когда я, будучи аспирантом (это было в середине 2000-х гг.), ознакомился со статьей Каллен, уже существовал вполне надежный «справочник» по геномной ДНК человека, а стоимость секвенирования ДНК стремительно уменьшалась. Я и мои коллеги из Бродовского института при Массачусетском технологическом институте — Чэд Нусбаум (Chad Nusbaum), Андреас Нирке (Andreas Gnirke) и Эрик Лэндер (Eric Lander) — разработали подход, позволяющий оценивать частоту контактов не двух сегментов ДНК в данный момент времени, а всех сегментов по геному. Мы могли также определять точное местоположение в полинуклеотидной цепи участников таких контактов.

Далее мы совместили наш подход с модификацией метода Каллен, разработанной Джобом Деккером (Job Dekker) из Медицинской школы при Массачусетском технологическом институте. Суть модификации состояла в том, что все процедуры проводились не с интактным клеточным ядром, а с его содержимым, помещенным в крайне разбавленный раствор. В таком варианте, названном Деккером «фиксация конформации хромосомом»

(*chromosome conformation capture*, или *3C*), можно было получить более точную оценку частоты контактов.

Затем мы усовершенствовали *3C*-модификацию, присоединив к концам «осколков» ДНК легко регистрируемые метки, что позволяло увидеть, где соединяются два сегмента. Далее мы разрезали «склеившиеся» фрагменты на более мелкие части и изолировали только те из них, которые содержали метки; это были места соединений в чистом виде. В сотрудничестве с Деккером и его аспирантами Нинке ван Беркумом (Nynke van Berkum) и Луизой Уильямс (Louise Williams) из Бродовского института мы смогли идентифицировать одновременно миллионы контактов. Я назвал данный метод *Hi-C* — от *3C* Деккера и названия любимого мною в детстве напитка. Статья об этом методе вышла в 2009 г.

Самые первые *Hi-C*-карты геномов показали, что хромосомы, несмотря на сходство со спагетти в кипящей воде, внутри ядра не находятся в состоянии беспорядочного клубка. Каждая из них подразделяется на домены — участки ДНК, содержащие сегменты, которые часто контактируют друг с другом. Локусы одного домена взаимодействуют с локусами другого реже. Что еще более интересно: каждый домен находится внутри одного из двух более крупных образований. Мы назвали их компартментами *A* и *B*.

Обнаружилось, что компартмент *A* богат маркерами генной активности — сигнальными молекулами, которые регулируют деятельность других клеточных органелл. Компартмент *B* характеризуется более плотной упаковкой и по большей части не проявляет никакой активности. Когда домены включаются или выключаются, они перемещаются из одного компартмента в другой. (Сегодня мы знаем, что в клеточном ядре имеется много *A* и *B*-субкомпартментов.)

Открытие феномена динамической компартиментализации подтверждает, что трехмерная структура генома формируется неслучайным образом и тесно связана с активностью генов. Вызывает удивление, однако, что одна особенность укладки генома никогда не обнаруживалась на *Hi-C*-картах: петли!

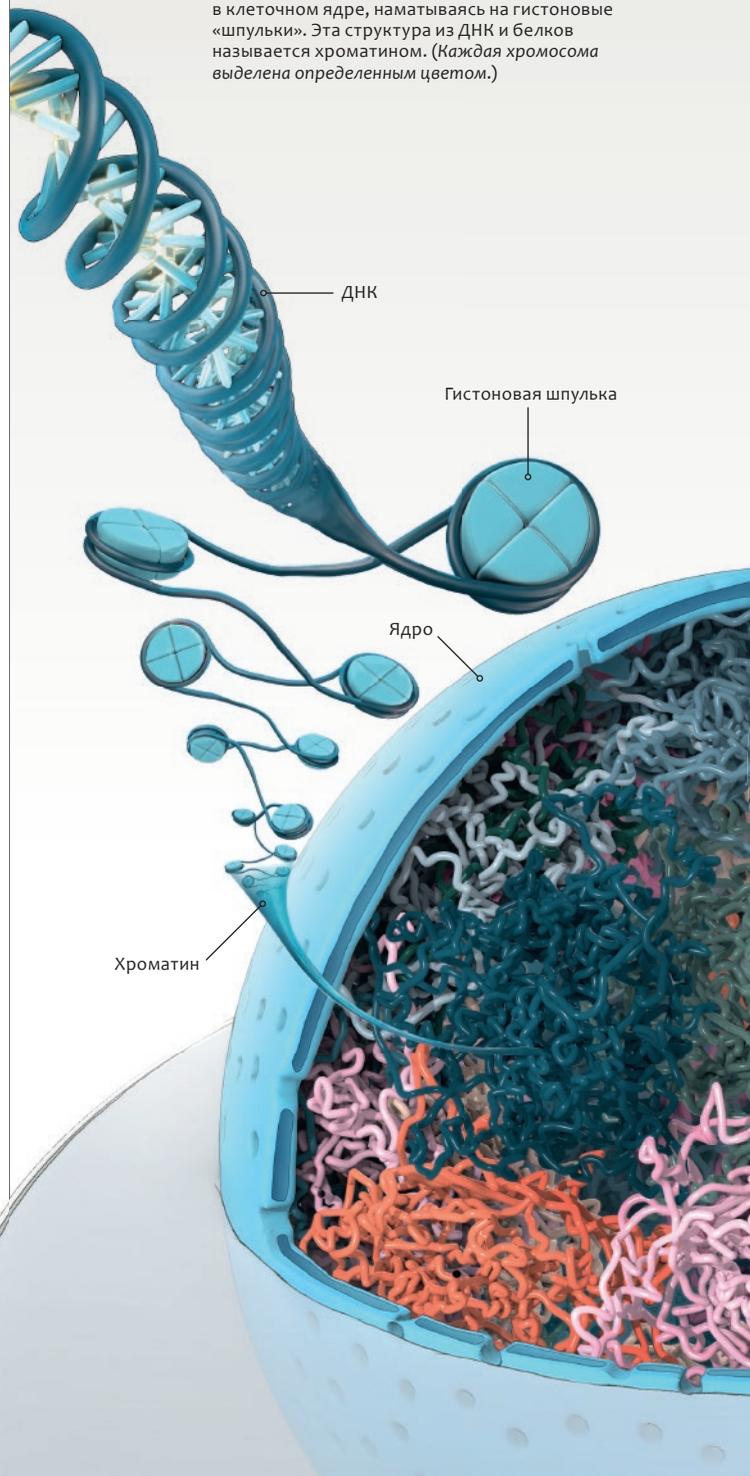
Hi-C-данные часто представляют в виде некоего подобия температурной карты: схемы, иллюстрирующей, как часто локусы хромосомы контактируют друг с другом. Частота контактов характеризуется яркостью пятен на координатной плоскости (x, y). Петле должно было бы соответствовать необычайно яркое пятно, отражающее наличие двух контактов в одном сайте. Ничего подобного мы не наблюдали. Но если мы не можем локализовать петли, то как выяснить, действительно ли энхансеры активируют гены путем физического сближения с промоторами?

Петляющий геном

Под микроскопом геном — набор всех клеточных хромосом — напоминает беспорядочный клубок вермишелин. На самом деле его пространственная организация вовсе не случайна. При большем увеличении обнаруживается, что геномная ДНК укладывается с образованием примерно 10 тыс. петель, не перепутывающихся друг с другом. Недавно ученым удалось найти ключ к загадке образования петель (вверху справа). Петли помогают выяснить, какие гены экспрессируются, а какие нет, в разных клетках (внизу справа).

Упаковка хромосом

Главная составная часть хромосом — двухцепочечная молекула ДНК. Она упаковывается в клеточном ядре, наматываясь на гистоновые «шпильки». Эта структура из ДНК и белков называется хроматином. (Каждая хромосома выделена определенным цветом.)



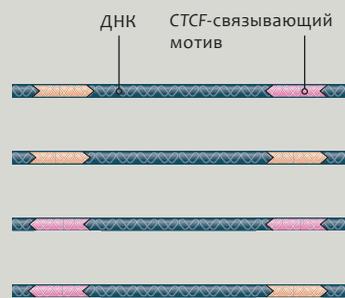
Как образуются петли

Экструзия петли начинается с присоединения к ДНК «экструзионного комплекса». Как только две его субъединицы, включающие кольцеобразную структуру под названием «когезин», начинают скользить по молекуле ДНК навстречу друг другу, начинает образовываться петля. При определенных условиях этот процесс

может блокировать белок CTCF. Он присоединяется к специфической нуклеотидной последовательности ДНК, которая находится в одной из двух ориентаций **A**. Когда когезиновое кольцо наталкивается на CTCF, связанный с мотивом, который ориентирован по направлению к петле, субъединица останавливается.

Если CTCF направлен в противоположную сторону, ее движение продолжается. Когда оба кольца наталкиваются на CTCF, направленные навстречу друг другу, они прекращают скольжение и петля фиксируется **B**. При любой другой ориентации петля продолжает расти **C**.

A Четыре возможных ориентации мотивов

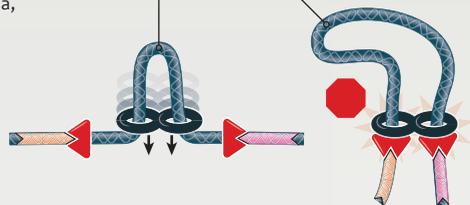


B Петля фиксируется, если когезиновые кольца наталкиваются на два CTCF-мотива, ориентированных в сторону петли

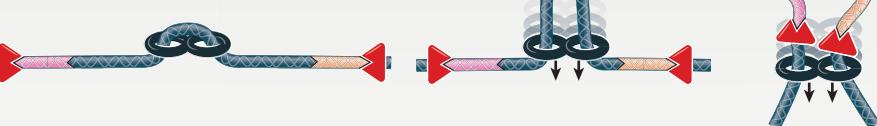


Растущая петля

Фиксированная петля

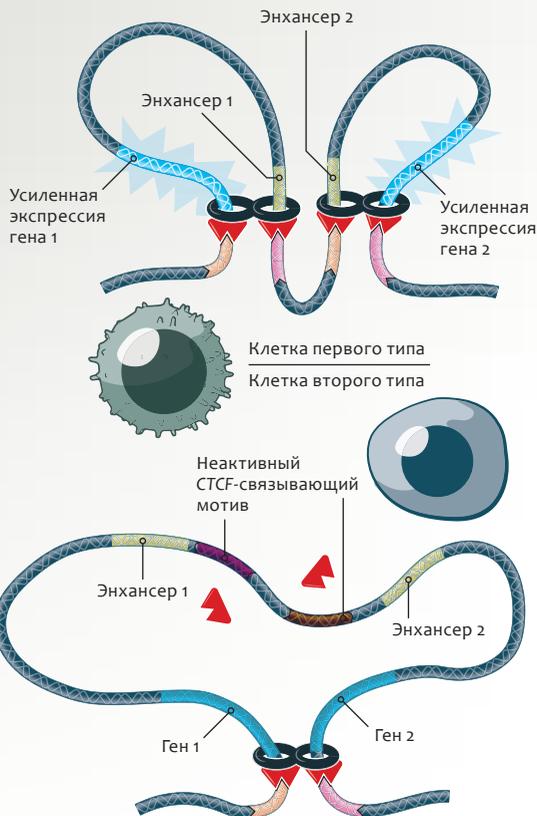


C Когезиновые кольца обходят CTCF-связывающие мотивы, ориентированные в стороны от исходной петли. Петля продолжает расти.



Зачем нужны петли

Для активации ген должен вступить в контакт с сегментом ДНК под названием «энхансер». Но очень часто энхансеры находятся на большом расстоянии от соответствующих генов. Образование петель способствует сближению энхансера со своим геном. Набор генов и CTCF-связывающих мотивов у всех клеток данного организма одинаков, но клетки, которым не нужно, чтобы те или иные гены экспрессировались, могут заблокировать их, удалив петли путем инактивации CTCF-связывающих мотивов.



Составление карты петель

Ответ мы нашли только через три года. В 2012 г. Рао и Хантли поняли, в чем была наша ошибка: разрушая клеточные ядра до лигирования, мы уничтожали тонкую структуру таких образований, как петли. Осознав это, Рао и Хантли усовершенствовали *Hi-C*-метод, чтобы лигирование происходило в интактных ядрах.

Новый метод, названный *Hi-C in situ*, все расставил по своим местам. Используя в качестве объекта исследований лейкоциты, ученые зарегистрировали на всех «температурных картах» яркие пятна, каждое из которых предположительно соответствовало одной петле. Но ведь прошло шесть лет с тех пор, как я начал заниматься картированием петель; и мне не верилось, что наконец-то найден способ, как это сделать. Мы опасались, что выдаем желаемое за действительное.

Намереваясь удостовериться, что мы не ошибаемся, я принес карты домой и показал их своему трехлетнему сыну Габриэлю. «Видишь красное пятно?» — спросил я его. «Да», — ответил он и указал на него пальцем.

Итак, мы получили карту, на которой были представлены 10 тыс. петель, рассеянных по всему геному, и убедились, что многие из них связаны с промоторами и энхансерами.

Затем мы сделали то же самое с клетками легких и обнаружили множество таких же петель. Но параллельно увидели другие контакты, предпочтительно имеющие отношение к другим энхансерам и другим генам. Это наводило на мысль, что петли могут участвовать в регуляции активности генов, обеспечивая идентичность клеток.

Свойственно ли образование петель только геному человека или такие же петли присутствуют в ДНК других видов живых существ? Построив карту петель для мышинных клеток, мы увидели, что примерно половина петель занимает в их геноме такую же позицию, как и в геноме человека. Эти петли сохранились на протяжении 60 млн лет эволюции начиная с тех созданий, которые обитали на Земле задолго до того, как река Колорадо начала прокладывать свой путь в скалах, формируя Большой каньон.

Логика поведения петель

Наши данные приводят к одному интересному выводу: петли — не статичные структуры, они образуются, исчезают и вновь появляются. Естественно, мы захотели выяснить, как это происходит.

Нам представлялось, что в процессе принимают участие сотни белков. Однако оказалось, что все петли ассоциированы всего с двумя белковыми факторами. Первый, *CTCF*, был открыт Виктором Лобаненковым с коллегами в 1990 г. Он состоит из 11 так называемых цинковых пальцев, с помощью которых прочно связывается

с определенными участками ДНК. Второй фактор, когезин, идентифицировал в 1997 г. Ким Насмит (Kim Nasmyth), ныне работающий в Оксфордском университете. Этот фактор представляет собой кольцеобразный комплекс из нескольких белков. Два таких кольца, соединенные друг с другом, охватывают соседние участки ДНК и скользят вдоль молекулы, как бусины по нитке ожерелья.

Выход на сцену этих белков не стал для нас полной неожиданностью: гораздо более ранние исследования наводили на мысль об их участии в пространственной укладке генома, хотя такое необычное их свойство, как «заякоривание» петель (а особенно связывание петель с промоторами и энхансерами), было новостью.

Затем мы столкнулись с чем-то еще более удивительным. Рао, Хантли и я попросили Айдо Мэчолла (Ido Machol), высококвалифицированного программиста, исследовать распределение гистонов (молекул, участвующих в упаковке ДНК) в окрестности *CTCF*. Обнаружилось, что с наружной стороны петель их больше, чем с внутренней, — как будто гистоны каким-то образом осведомлены о том, как располагается петля относительно *CTCF*. Вначале мы подумали, что это какая-то ошибка в работе Мэчолла, но шли недели — и никакой ошибки не обнаруживалось.

Тогда мы стали искать биологическое объяснение данному феномену. В своей первой статье об открытии *CTCF* Лобаненков отметил, что этот фактор связывается не с каким угодно участком ДНК, а только со специфическим локусом длиной примерно 20 пар нуклеотидов, названным мотивом. Он может располагаться на любой из двух цепей молекулы ДНК и ориентироваться в одном случае на ее начало, в другом — на конец. Ориентальная ориентация мотивов обычно случайна, 50 : 50. И мы ожидали, что ориентация *CTCF*-связывающих мотивов тоже будет случайной.

Не могут ли *CTCF*-связывающие мотивы давать гистонам указание, где они должны присоединиться к ДНК? Мы проверили, так ли это, и с удивлением обнаружили, что два коротеньких *CTCF*-мотива, даже разделенные миллионами пар оснований в цепи ДНК, всегда ориентированы навстречу друг другу и к петле; мы назвали данный феномен конвергентной ориентацией. Он объясняет, каким образом гистоны узнают, где им надлежит находиться: они просто «выясняют», как ориентированы *CTCF*-связывающие мотивы.

Но, ответив на одну загадку, правило конвергентности породило другую, гораздо более замысловатую. Неслучайная ориентация мотивов не поддается объяснению. Давайте снова увеличим размер генома в миллионы раз. Теперь длина каждого мотива составит 5 мм, а расстояние между ними будет равно примерно 1 км. И тем

не менее, как по указанию волшебного компаса, мотивы на противоположных концах сегмента ДНК, образующего петлю, будут ориентированы навстречу друг другу. Как любой волшебный трюк, правило конвергентной ориентации невыполнимо с точки зрения физики. Оно также противоречит общепризнанной точке зрения на то, как образуются петли.

В то время почти все — и мы в том числе — полагаем, что к их образованию причастна диффузия. В соответствии с этой схемой одна белковая молекула, опосредующая образование петли, связывается с одним концом сегмента ДНК, который затем образует петлю, другая — с противоположным ее концом. Молекула ДНК — динамичная структура, она, как мы уже говорили, похожа на вермишель в кипящей воде. Если в ходе хаотичного перемещения два упомянутых белка сближаются, они связываются друг с другом и образуется петля. Но в таком случае взаимная ориентация *CTCF*-связывающих мотивов не должна иметь значения. А мы видим, что она всегда одинакова. Правило конвергентности подтвердили еще две группы исследователей. Одну возглавляет Сюзана Хаджур (Suzana Hadjur) из Медицинской школы Лондонского университета, другую — Ицзюнь Жуань (Yijun Ruan) из Джексонской лаборатории.

Выталкивание петель?

Если диффузия не причастна к образованию петель, то как они появляются? И какова роль *CTCF* и когезина?

Я уверен, что большинство людей, размышляя об укладке генома, крутят в руках что-то похожее на длинную макаронину: шнурок или пластиковый проводок. Однажды мы с Рао мучили свои наушники, пытаясь придумать модель формирования петель. И вдруг до нас дошло: нам следует заниматься не наушниками, а своими рюкзаками.

Представьте себе устройство для подгонки длинных лямок мягкого рюкзака. Оно состоит из двух соединенных колец. Шнурок входит в первое кольцо и выходит из второго. Если нужно укоротить лямочки, вы тянете за шнурок между кольцами — и получаете петельку. Ее можно увеличить, потянув за шнурок дальше, пока не упрутся в складки материи.

Может быть, пары когезивных колец работают аналогично? Сначала они присоединяются к геномной ДНК, так что последняя входит в одно кольцо и выходит из другого. Кольца скользят вдоль молекулы во взаимно противоположных направлениях, выталкивая участок ДНК, который складывается в петлю. Но скользят они не до бесконечности. В какой-то момент одно кольцо оказывается вблизи *CTCF*. Если мотив, с которым последний связан, ориентирован в сторону приближающегося кольца, скольжение прекращается.

Но если он «смотрит» в противоположную сторону, когезин продолжает движение. Второе кольцо тоже перемещается до тех пор, пока не приблизится к «смотрящему» на него *CTCF*-связывающему мотиву. Образовавшаяся петля больше не растет.

Если когезивные кольца действительно работают таким образом, то петли должны образовываться только между парами *CTCF*-связывающих мотивов, подчиняющихся правилу конвергентности. Мы быстро поняли, что этот процесс выталкивания (экструзии) дает клетке большие преимущества. Если бы петли образовывались в результате диффузии, то пары петель в хромосоме легко перепутывались, образуя узлы. В результате гены не могли бы функционировать надлежащим образом, а хромосомы не расходились перед началом деления клетки. В отличие от этого петли, образуемые путем экструзии, не перепутываются и никаких узлов не возникает.

Такая модель имела чисто спекулятивный характер. Она основывалась на многих предположениях, адекватность которых мы не могли проверить. Так, не было прямых указаний на то, что когезин может скользить вдоль ДНК. На правильном ли мы пути? Но прочтя все, что известно о когезине, мы обнаружили, что еще в 2001 г. Насмит высказал предположение об экструзии ДНК. Санборн осуществил детальное моделирование, суммировав данные по всем нашим картам. А когда Рао провел эксперименты с самой ДНК, картина образования петель в точности совпала с тем, что предсказывала модель Санборна.

Делеция *CTCF*-связывающего мотива вблизи петли приводила к элиминации петли. При изменении ориентации мотива петля исчезала, но появлялась другая в новом месте. Добавление правильно ориентированного *CTCF*-мотива тоже приводило к образованию новой петли. Итак, мы обнаружили, что можем добавлять или убирать петли по желанию.

Мы тут же отправили в печать статью с описанием своей модели и экспериментов по ее тестированию. Реакция не заставила себя ждать. В пределах нескольких недель осенью 2015 г. одна за другой появились несколько статей, подтверждающих наши результаты. Затем три группы исследователей — наша собственная, вторая из Университета Эмори и третья из Массачусетского технологического института — сообщили, что правило конвергентности согласуется с моделью, согласно которой петля образуется в результате экструзии. Наконец-то научное сообщество приблизилось к разгадке логики формирования петель.

Дальше события начали развиваться с головокружительной быстротой. Бенуа Брюно (Benoit Bruneau) с коллегами из Института Гладстона показал, что манипуляции с *CTCF* существенно ослабляют петли. Франсуа Шпиц (Francois Spitz)

с сотрудниками из Европейской лаборатории молекулярной биологии наблюдали сходный эффект, удалив белок, который предположительно отвечает за связывание когезина с ДНК. Группа Бенджамина Роуланда (Benjamin Rowland) из Нидерландского онкологического института показала, что отсоединение некоего фактора, который отщепляет когезин от ДНК, приводит к образованию петель большего размера. Далее Рао продемонстрировал, что, разрушив когезин, можно уничтожить все петли за несколько минут.

Но нам по-прежнему не хватало прямого доказательства: экстррузии в действии. Наконец, в апреле 2018 г. Сиз Деккер (Sees Dekker) из Делфтского технического университета в Нидерландах добился и этого. Используя конденсин дрожжей — белковый комплекс, сходный с когезином, — он снял микрофильм, который произвел на всех неизгладимое впечатление. Сначала вы видели линейную молекулу ДНК. Затем к ней присоединялся конденсин — и на ДНК появлялся небольшой бугорок. Он постепенно разрастался — и, наконец, превращался в петлю.

Не только регуляторы

С выяснением механизма образования петель стало все более очевидным, что эти структуры имеют отношение к состоянию здоровья организма. Так, Фредерик Альт (Frederick Alt) с коллегами из Гарвардского университета предположил, что они причастны к выработке антител. По ходу процесса происходит разрезание генов, кодирующих антитела, и последующее сшивание фрагментов. Обнаружилось, что при этом образуется множество *CTCF*-заякоренных петель и их последующее вырезание.

В лаборатории Стефана Мундлоса (Stefan Mundlos) из Института молекулярной генетики Макса Планка в Берлине было показано, что видоизменение одного из *CTCF*-связывающих мотивов в геноме мыши приводит к аномалиям в развитии пальцев. У человека с аналогичными видоизменениями недостает пальцев. А по данным Рафаэля Каселласа (Rafael Casellas) из Национальных институтов здравоохранения, разрушение *CTCF*-связывающих мотивов у мышей с плазмацитомой — одной из разновидностей рака — иногда замедляет рост опухоли на 40%.

Чем более адекватным представлялся механизм образования петель путем экстррузии, тем больше разного рода теорий относительно роли петель в регуляции активности генов отвергалось. Долгое время считалось, что петли работают как тумблеры: если между энхансером и промотором образуется петля, соответствующий ген включается. Таким образом, ожидалось, что в отсутствие в клетке когезина экспрессия генов разбалансируется, сотни из них изменят уровень активности. Это

действительно имело место, но в крайне малых масштабах. Петли — по крайней мере те, которые образуются путем экстррузии, — вовсе не тумблеры. Они скорее похожи на ручку громкости, которая немного повышает активность гена или немного ее понижает, осуществляя тонкую подстройку к потребности клетки в тех или иных белках.

Казалось, мы поняли правила игры, но, увидев петли в действии, пришли к выводу, что наши представления слишком упрощены. Возможно даже, что регуляторная функция петель — это не основная их роль, они делают еще что-то другое.

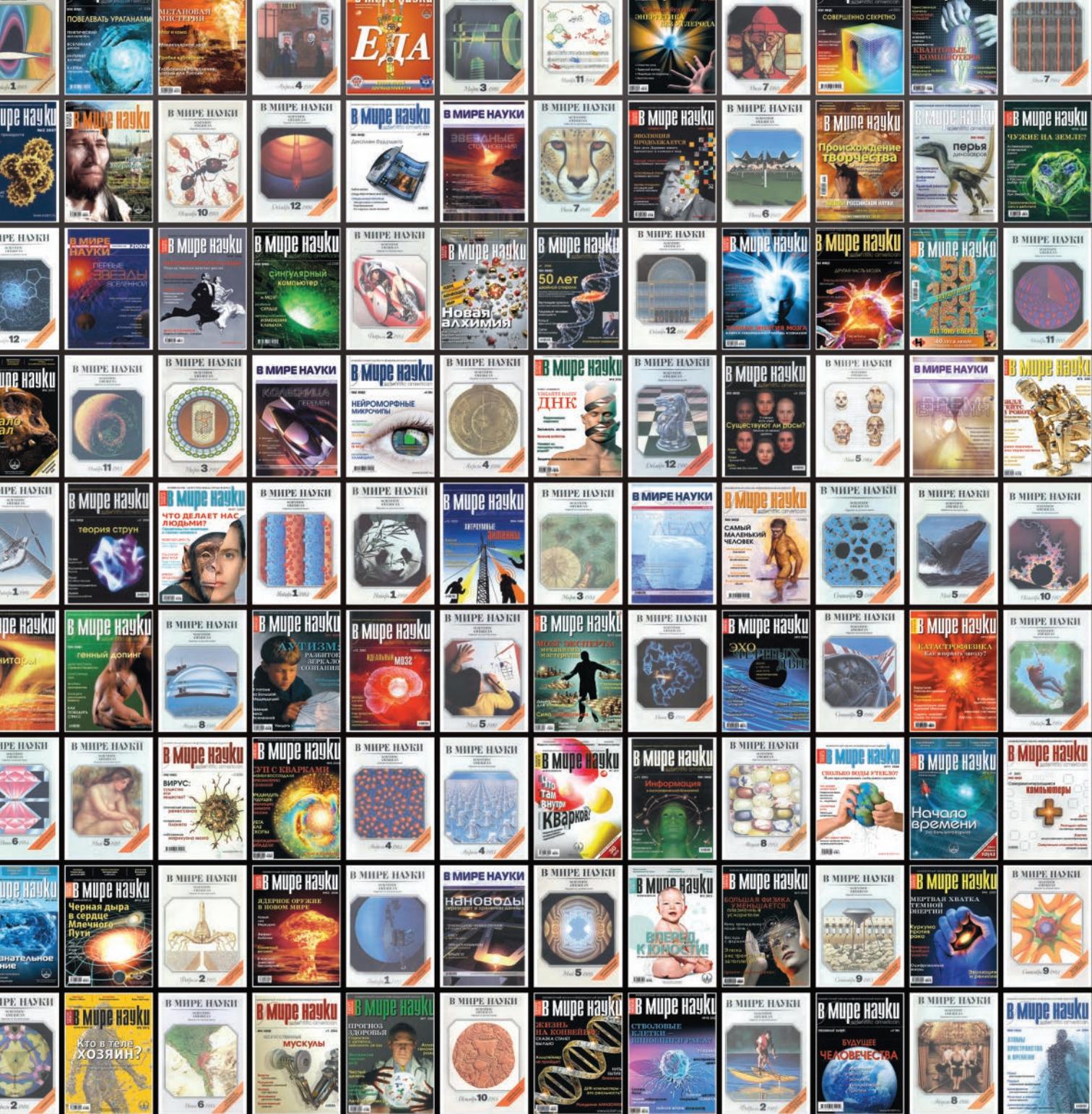
Как любому исследователю новых земель, нам нужна была карта. Мой коллега Жуань, участник проекта «Энциклопедия элементов ДНК» (*ENCODE*), осуществляемого Национальными институтами здравоохранения, и я с коллегами работаем над созданием атласа петель в геноме человека, картируя петли в ДНК всех тканей человеческого тела. Вместе с другими коллективами ученых мы создали консорциум *4D Nucleome*, который разрабатывает новые подходы к решению этой проблемы. Ольга Дудченко из моей лаборатории объединила сотрудников академических лабораторий и зоопарков по всему миру, которые пытаются создать базу данных по геномам сотен видов и проследить эволюцию петель по всему древу жизни.

В науке конец одного исследования всегда знаменует начало другого. Процесс экстррузии ДНК существовал еще до появления клеточного ядра, 2 млрд лет назад. Почему? Это вопрос, на который нам предстоит ответить. ■

Перевод: Н.Н. Шафрановская

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Мистели Т. Частная жизнь генома // *ВМН*, № 4, 2011.
- Interaction between Transcription Regulatory Regions of Prolactin Chromatin. K.E. Cullen, M.P. Kladdé and M.A. Seyfred in *Science*, Vol. 261, pages 2003–2006; July 9, 1993.
- A 3D Map of the Human Genome at Kilobase Resolution Reveals Principles of Chromatin Looping. Suhas S.P. Rao et al. in *Cell*, Vol. 159, No. 7, pages 1665–1680; December 18, 2014.
- Chromatin Extrusion Explains Key Features of Loop and Domain Formation in Wild-Type and Engineered Genomes. Adrian L. Sanborn et al. in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 112, No. 47, pages E6456–E6465; November 24, 2015.
- Real-Time Imaging of DNA Loop Extrusion by Condensin. Mahipal Ganji et al. in *Science*, Vol. 360, pages 102–105; April 6, 2018.



Хотите знать о науке больше?

Полный архив выпусков журнала
«В мире науки» — на сайте издания
по адресу: www.sciam.ru

В мире науки
SCIENTIFIC AMERICAN

Теперь можно купить
и отдельные статьи



СКОРБЬ

ПОВЕДЕНИЕ ЖИВОТНЫХ



КОСАТКИ

Огромное число новых наблюдений позволяет
понять, почему одни виды животных
переживают горе, а другие — нет

Барбара Кинг



Косатки относятся к числу многих
видов животных, которые,
как теперь понятно, переживают горе

В прошлом июле самка косатки по имени Джей-35 привлекла всеобщее внимание. Джей-35, также известная как Талекуа, — представительница популяции косаток, обитающей у побережья штата Вашингтон и провинции Британская Колумбия в южной части моря Селиш (водной системы, состоящей из проливов Хуан-де-Фука, Джорджия и залива Пьюджет). За этой популяцией ведется пристальное наблюдение. Джей-35 только родила детеныша, период вынашивания длился почти полтора года. Это была самка — второе потомство Джей-35 и первый за три года детеныш, родившийся живым в этой уменьшающейся популяции косаток. Но спустя 30 минут после рождения детеныш умер. Джей-35 не отпустила свою дочь: с огромными усилиями она плыла, держа детеныша на голове, и глубоко ныряла, чтобы достать крошечное тело, когда оно соскальзывало. Другие члены стада заметили страдания Джей-35: в какой-то момент группа самок собралась вокруг нее в плотное кольцо — очевидный акт эмоционального сопереживания, продлившийся не менее двух часов. Лишь спустя 17 дней, проплыв 1,6 тыс. км, Джей-35 отпустила своего малыша навсегда.

ОБ АВТОРЕ

Барбара Кинг (Barbara J. King) — писатель, почетный профессор антропологии в Колледже Вильгельма и Марии.



Реакция Джей-35 на смерть ее детеныша послужила серьезным напоминанием о том, что люди — не единственные, кто переживает горе. Десятилетиями специалисты по поведению животных с осторожностью относились к приписыванию эмоций другим видам живых существ. Но наше мнение поменялось с появлением новых исследований. Шесть лет назад я написала для *Scientific American* статью о только зарождавшейся тогда области исследований, связанной с переживанием горя животными. С тех пор количество исследований резко увеличилось. Во время некоторых наблюдений, как в случае с Джей-35, удается выявить новые и трогательные детали, касающиеся тех видов, о которых уже было известно, что они переживают горе. В ходе других исследований этот феномен выявляется у новых видов.

Подобные наблюдения приносят удивительные открытия о первопричинах чувства скорби. Раньше казалось, что тяжелую утрату чувствуют млекопитающие с большим размером мозга: приматы, слоны и китообразные. Но последние свидетельства указывают на обратное. Млекопитающие с крупным мозгом могут переживать горе более тонко по сравнению с некоторыми другими животными благодаря их развитому мышлению и сложной социальной структуре внутри групп. Однако теперь очевидно, что выражение скорби не зависит только от относительного размера мозга и когнитивных способностей. Способность к формированию близких взаимоотношений становится значимым самостоятельным фактором, определяющим, какие виды животных оплакивают свои утраты.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Ученые обычно неохотно приписывали человеческие эмоции, в том числе способность горевать, другим видам животных.
- Однако в последние годы накопились данные о переживании горя животными. Выясняется, что представители разных видов скорбят о потере близких друзей.
- Исследования показывают, что существует множество факторов, определяющих, проявляют ли конкретные виды животных эмоциональные реакции на смерть.



Самка косатки по имени Джей-35 удерживала тело своего мертвого детеныша 17 дней, прежде чем отпустить его

Определение понятия «горе»

Изучение скорби у животных — все еще достаточно новое направление, и исследователи продолжают спорить, как распознать ее проявления. В 2017 г. в маленьком горном городке Прескотте в штате Аризона умерла самка ошейникового пекари (*Pecari tajacu*) — одна из маленького стада из пяти свиноподобных млекопитающих. В течение следующих десяти дней животные из стада этой самки приходили к телу, ели поблизости, спали рядом с ним и защищали его от хищников. Такую продолжительную реакцию на смерть зафиксировала видеочкамера для съемок в дикой природе, оснащенная датчиком движения, — подарок на день рождения третьекласснику Данте де Карту (Dante de Kort), который установил камеру спустя два дня после того, как заметил тело пекари около своего дома. Когда мальчик в следующем месяце показал снимки поведения животных на школьной ярмарке научных проектов, он познакомился с биологом Марианой Альтрихтер (Mariana Altrichter) из Колледжа Прескотта. Произшедшая по случайной случайности встреча привела к публикации статьи о пекари в февральском номере журнала *Ethology* за 2018 г. (Данте де Корт был ведущим автором) и к возобновлению обсуждения вопроса об определении термина «горе» и о том, каковы масштабы переживания горя в царстве животных.

Данте де Корт установил камеру в пяти метрах от тела мертвой пекари и запрограммировал на съемку десятисекундных роликов с интервалом

в 30 с. Камера запечатлела 93 видеоролика с пекари. Почти половину записанного времени члены стада ходили или стояли в пределах 5 м от мертвой самки. И более трети времени на записи они непосредственно контактировали с телом: с разных точек они пристально смотрели на мертвую самку, тыкали носом, обнюхивали, прикусывали и пытались ее поднять. Они также спали, касаясь мертвого тела, и защищали его от койотов. Почти половину времени на записи рядом с телом находились одни и те же пекари (по крайней мере кажется, что одни и те же, насколько можно идентифицировать отдельных особей).

В своей статье де Корт с соавторами отмечают, что действия пекари выходят за рамки, в которых оценивалась сложность поведения этой группы, и демонстрируют, что эти животные напоминают людей и шимпанзе по своей реакции на смерть. Но ученые не решаются назвать такую реакцию скорбью, они утверждают, что «неспособны определить, скорбь ли это».

Пекари принадлежат к отряду парнокопытных, к этой же группе относятся бараны и антилопы. О переживании горя парнокопытными известно очень мало, но поведение пекари близко соответствует критериям, которые я определила для скорби в своей книге «Как горюют животные» (*How Animal Grieve*): после смерти сородича поведение выживших животных меняется определенным образом, который указывает на сильное страдание. В зависимости от вида животного такие изменения могут включать атипичное поведение во время

приема пищи или сна; прекращение социальной активности и выражение горя рядом с мертвым телом посредством голосовых сигналов, выражений лица или языка тела.

Можно ли утверждать с абсолютной уверенностью, что пекари, или некоторые из них, горевали, а не проявляли общую тревожность, связанную с изменением структуры их стада? Нет. Данное мною определение скорби основывается на интерпретации сигналов, наблюдаемых нами со стороны отдельных особей, и в этом случае всегда существует вероятность ошибки, потому что мы не можем прочесть мысли животного или знать о его намерении. И все же, зная о том, что пекари объединяются в маленькие тесные группы, характеризующиеся в основном кооперацией и дружеским взаимодействием, таким как груминг, я полагаю, что настолько же рискованно отвергать вероятность того, что они испытывают горе. В электронном письме Мариана Альтрихтер объяснила мне, что они с коллегами не хотели истолковывать эмоциональные аспекты поведения пекари в своей статье и предпочли просто сообщить о наблюдавшихся фактах. Но она допускает, что реакция животных «соответствует разумному определению скорби для животных, кроме человека».

Нежелание называть горе своим именем в рецензируемой научной литературе по этологии (поведению животных) связано с тем, что на протяжении долгой истории этой дисциплины ученых, решившихся заниматься эмоциями животных, обвиняли в антропоморфизме — приписывании человеческих качеств и способностей другим видам животных. Эти обвинения иногда все еще выдвигают в научном сообществе и сегодня. Тем не менее, оказывается, сама наука о поведении животных демонстрирует, что в царстве животных люди не обладают монополией на выражение печали (или, что так же важно, противоположной эмоции: радости).

В данном случае уточнение терминологии — ключевой момент. В нейробиологии «эмоция» в значении «возбуждение, волнение» означает состояние организма под влиянием внешнего стимула, тогда как «эмоция» в значении «переживание, чувство» — ментальное состояние, сопровождающееся изменениями в состоянии организма. В такой системе чувства — это осознанные переживания. Используя термин «эмоции», я тем не менее не имею в виду, что животные не осознают свое горе. Я исхожу из представления, общего для антропологии и возрастной психологии, согласно которому восприятие и обработка стимулов мозгом действительно подготавливают индивиду для выражения эмоции, но эта эмоция появляется в контексте развивающегося события между социальными партнерами. Эмоцию выражают



Ослы, пекари и нечеловекообразные обезьяны недавно вошли в число животных, о которых известно, что они проявляют эмоциональные реакции на смерть

животные, обладающие сознанием. Поэтому я бы удивилась, если бы ученые вдруг наблюдали проявления скорби у социальных насекомых, таких как муравьи, термиты и пчелы, которые отыскивают и иногда даже закапывают тела мертвых сородичей, ведомые исключительно системой химической сигнализации в отличие от сознательного принятия решений.

Большое горе повсюду

Наблюдения за пекари убедительно доказывают, что способность горевать характерна не только для животных с большим мозгом. Но пекари — не единственный вид, который так поступает.

На видео, снятом в приюте *Donkey Farm Foundation* в Нидерландах, печальные ослы, издавая потрясающе громкие крики, бродят вокруг

2



3



усыпить. Той ночью тело Джейка накрыли брезентом, чтобы на следующий день похоронить, но Лена сдернула покрытие. «Всю ночь Лена бродила вокруг тела и отказывалась уходить, — вспоминают Фоли и Белланд. — Когда на следующий день Джейка хоронили, она последовала за телом к вырытой яме и оставалась около могилы несколько дней, била копытами землю и кричала по ночам. Она отказывалась уходить даже ради еды и воды».

Я читала это описание со слезами на глазах. В последующие недели Лена начала восстанавливаться: постепенно она стала нормально есть и пить, искала общества других лошадей. Может быть, помогло то, что ей дали возможность провести время рядом с телом Джейка. Действительно, все чаще в приютах, зоопарках и ветеринарных клиниках животному, потерявшему друга, дают такую возможность — это практическое применение результатов исследований переживания горя у животных, которое я приветствую.

По данным Салис Шаттлсуорт (Salise Shuttlesworth), основателя и исполнительного директора приюта для животных «Друзья жизни» в Хьюстоне, хорьки тоже выражают скорбь из-за смерти сородичей. В приюте в результате неожиданного печального поворота событий за шесть недель от разных заболеваний погибли все четверо самок хорьков в возрасте от семи до восьми лет. Дольше всего прожили две самки — Пинки и Эффи. Когда болезнь надпочечников, от которой страдала Эффи, достигла поздней стадии, Салис Шаттлсуорт позаботилась о проведении эвтаназии. Ранее Пинки интенсивно обыскивала домик в поисках другой своей подружки-хорька, которая уже погибла. Когда началась процедура эвтаназии, Пинки опять отреагировала очень бурно. «Она протискивалась между руками доктора и Эффи, — рассказывала Шаттлсуорт. — Когда доктор попытался прослушать сердце Эффи, Пинки пролезла под стетоскоп. Она чистила Эффи ухо. В конце концов Пинки просто

тела старого самца, лежащего на земле. О переживающем горе ослике также говорилось в сообщении, присланном мне в 2018 г. из приюта для животных «Движения за спасение и переселение сельскохозяйственных животных» (*Farm Animal Rescue and Rehoming Movement, FARRM*) в канадской Альберте. Основателя движения Мелиссу Фоли (Melissa Foley) и волонтера Стефани Белланд (Stephanie Belland) беспокоило, что ослица по имени Лена очень тяжело восстанавливалась после смерти Джейка — коня, с которым она дружила в течение трех лет. Когда Джейк, которому было 32 года, тяжело заболел, его пришлось

до восьми лет. Дольше всего прожили две самки — Пинки и Эффи. Когда болезнь надпочечников, от которой страдала Эффи, достигла поздней стадии, Салис Шаттлсуорт позаботилась о проведении эвтаназии. Ранее Пинки интенсивно обыскивала домик в поисках другой своей подружки-хорька, которая уже погибла. Когда началась процедура эвтаназии, Пинки опять отреагировала очень бурно. «Она протискивалась между руками доктора и Эффи, — рассказывала Шаттлсуорт. — Когда доктор попытался прослушать сердце Эффи, Пинки пролезла под стетоскоп. Она чистила Эффи ухо. В конце концов Пинки просто

улеглась рядом с телом и застыла». Более двух часов после смерти Эффи Пинки не двигалась с места. Она погибла на следующий день от сердечной недостаточности.

В течение нескольких лет мне также приходили сообщения о сороках и канадских казарках, глубоко скорбящих при обнаружении тела погибшего сородича или партнера. Знание о том, что коровы горюют из-за гибели своих телят, а также когда телят через несколько дней после рождения навсегда отлучают от матерей, как практикуется на многих животноводческих фермах, существенно повлияло на мое недавнее решение перейти в основном на питание продуктами растительного происхождения.

Исследование показало, что почти четверть из 88 видов дельфинов и китов проявляли заботу об умершем в том или ином виде. Подавляющее большинство таких случаев зафиксировано у семейства относительно небольших китообразных, включающего дельфинов, косаток и гринд

Тем не менее не всякую реакцию животного на смерть сородича можно определить как горе. Мы с мужем сфотографировали события, последовавшие после смерти нашей кошки Хейли, которую пришлось усыпить, так как у нее была последняя стадия рака, не поддающегося лечению. Мы положили тело Хейли на подстилку на земле в уличном вольере, где жили шесть полудиких кошек, в том числе сестра Хейли по имени Кейли. Несколько кошек подошли и обнюхали тело, но не Кейли: она сидела неподвижно на некотором расстоянии и пристально смотрела на свою сестру еще долгое время после того, как остальные кошки вернулись к своим обычным занятиям. Она не выла, как делают другие кошки и собаки, когда погибает их партнер. Горевала ли Кейли? Исходя из ее близких отношений с сестрой, можно было бы предполагать, что да, но я не могу со всей ответственностью утверждать, что это была скорбь, так как Кейли не проявляла никаких видимых признаков.

Иногда более вероятным может оказаться альтернативное объяснение. На видео, снятом в 2017 г. Джонатаном Дэвисом (Jonathan Davis) из Рандолфа, штат Массачусетс, группа диких индеек на улице окружила кольцом тело мертвой кошки. Когда видео стало вирусным, люди стали выдвигать теории: было ли это что-то наподобие эмоционального межвидового ритуала, связанного со смертью? Более вероятно, говорят биологи-специалисты по дикой природе, что индейки проявили инстинктивное любопытство к обнаруженному мертвому телу: они следовали друг за другом и, исследуя объект вблизи, образовали круг.

Тесные узы

Эти и другие недавно зарегистрированные примеры проявления скорби у животных не только расширяют число биологических видов, переживающих горе, но и проливают свет на социальные условия, способствующие проявлению этой эмоции. Клэр Уотсон (Claire F.I. Watson) и Тэцуро Мацзуава (Tetsuro Matsuzawa) из Института изучения приматов при Киотском университете в специальном номере *Philosophical Transactions of the Royal Society* за 2018 г., посвященном реакции человека и животных на смерть близких, отмечают, что большинство сообщений о реагировании на смерть у млекопитающих касается матерей и их умерших детей. Так и есть. Но существует несколько интересных исключений из этого правила.

Теперь известно, что у приматов близкие социальные контакты, не связанные взаимоотношениями матери и детеныша, могут приводить к проявлению сильной реакции на смерть. Когда в 2011 году Томас, девятилетний самец шимпанзе, умер от легочной инфекции, свирепствовавшей в питомнике для диких животных Чимфунши в Замбии, другие шимпанзе из его группы из 43 особей проводили время около его тела, часто в неподвижности, что совершенно нехарактерно для этого вида легко возбудимых обезьян. Описывая поведение шимпанзе в статье, опубликованной в 2017 г. в *Scientific Reports*, Эдвин ван Леувен (Edwin J.C. van Leeuwen) из Сент-Андрусского университета в Шотландии отмечает, что два близких социальных партнера Томаса демонстрировали бросающиеся в глаза реакции. Пан, взрослый самец, друживший с Томасом, подходил к телу чаще, чем другие два самца, и энергично принимал демонстрационные позы. Ноэль, взрослая самка, усыновившая Томаса после смерти его матери, делала то, что никогда не наблюдалось в среде шимпанзе раньше: она чистила Томасу зубы с помощью травинки. Ноэль продолжала делать это, даже когда сотрудники питомника отвлекли других шимпанзе от мертвого сородича, предлагая им любимую еду — фрукты. Неизвестно, как долго продолжалось бы столь необычное поведение животных,

как минимум связанное с проявлением горя, если бы сотрудники питомника не убрали тело Томаса спустя 20 минут после его обнаружения.

Другие примеры переживания горя, не связанного с потерей детеныша, наблюдаются среди наших дальних родственников — приматов. Шесть лет назад я обратила внимание, что почти отсутствуют убедительные доказательства эмоциональной реакции на смерть среди нечеловекообразных обезьян. Сейчас ситуация изменилась: имеются сообщения о таком поведении обыкновенных игрунок (*Callithrix jacchus*) и макаков магот (*Macaca sylvanus*). А в 2016 г. Бинь Ян (Bin Yang) из Зоологического института китайской провинции Шэньси с коллегами сообщили, что они наблюдали реакцию на смерть в среде рокселлановых ринопитетков (*Rhinopithecus roxellanae*) в центральной части Китая. Самка рокселланова ринопитетка при падении с дерева разбила голову о камень. Как сообщили Ян с соавторами, члены группы окружали смертельно раненую обезьяну примерно в течение часа и «чутко заботились о ней, вглядывались и иногда обнюхивали ее лицо, чистили ей шерсть, обнимали и осторожно тянули за руку». Единственный взрослый самец в группе издавал предупреждающие крики, когда к телу пытались приблизиться малыши и подростки из другой группы. Когда самка ринопитетка умерла, самец постоянно дотрагивался до нее и тянул за руку. Примерно через пять минут он ушел, а на следующий день вернулся вместе со своей группой к тому месту, где погибла самка (тело уже захоронил научный сотрудник). Сильная связь между самцом и погибшей самкой существовала в течение трех лет после ее прихода в группу обезьян, возглавляемую этим самцом.

Что касается исследований скорби у животных, то еще так много предстоит открыть. Прежде всего, требуют проверки наши гипотезы о факторах, определяющих, испытывает ли конкретный вид животных горе или нет. В статье, вышедшей в журнале *Zoology* в 2018 г., Джованни Беарци (Giovanni Bearzi), президент итальянской некоммерческой организации «Биология и сохранение дельфинов», предлагает дальнейший способ действий. Беарци с коллегами провели анализ всех сообщений, опубликованных в период с 1970 по 2016 г., в которых описывается так называемая забота об умершем среди отдельных китообразных. Ученые учитывали сообщения как о диких животных, так и о живущих в неволе, но случаи, произошедшие в неволе в условиях, которые невозможны в дикой природе, исключались. Наблюдения касались такого поведения, когда кит или дельфин сопровождал тело, удерживал его на плаву или нес тело. В некоторых случаях выжившее животное пыталось «оживить» социального партнера, однако в других его действия явно соответствовали критериям определения скорби:

измененное поведение в течение многих дней, указывающее на страдание. Исследование показало, что почти четверть из 88 видов дельфинов и китов проявляли заботу об умершем в том или ином виде. Подавляющее большинство таких случаев (92,3%) зафиксировано у дельфиновых (*Delphinidae*) — семейства относительно небольших китообразных, включающего дельфинов, косаток и гринд. Напротив, среди крупных беззубых, или усатых, китов (*Mystacoceti*), за исключением одного случая, подобное поведение не наблюдалось. Что интересно, животные из семейства дельфиновых обладают более крупным мозгом и более развитой социальной структурой по сравнению с беззубыми китами. Если исходить из вышесказанного, будущее исследований скорби у животных — это сравнительный анализ реакции на смерть сородичей у близкородственных видов.

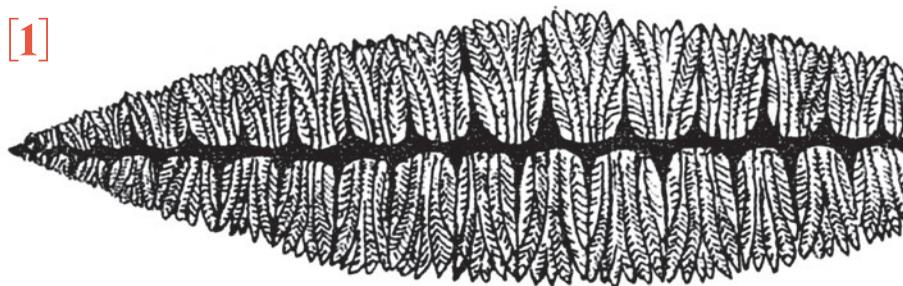
Тема переживания горя животными задевает чувствительные струны души больше, чем любая другая, связанная с поведением животных, о котором я пишу в течение 30 лет. Почему? Междовидовой подход к вопросам, связанным с переживанием горя, показывает, что сильные эмоции, проявляемые в связи со смертью, свойственны не только людям, но и другим животным, чьи социальные взаимоотношения выходят за рамки «уз», представляющих собой адаптации для выживания и размножения. Но, помимо эмоциональных страданий в результате разлуки с другом или любимым, осознают ли представители других видов животных, кроме человека, что смерть неизменна? Предчувствуют ли они собственную смерть? Интересно, смогут ли научные данные дать удовлетворительный ответ на вопросы такого характера. Тем не менее дальнейшие наблюдения за поведением животных, вероятно, помогут представить более отчетливо, кто переживает горе и в каких обстоятельствах. ■

Перевод: С.М. Левензон

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

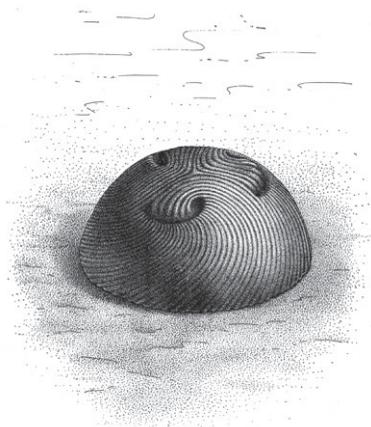
- How Animals Grieve. Barbara J. King. University of Chicago Press, 2013.
- Personalities on the Plate: The Lives and Minds of Animals We Eat. Barbara J. King. University of Chicago Press, 2017.
- Evolutionary Thanatology: Impacts of the Dead on the Living in Humans and Other Animals. Edited by James R. Anderson, Paul Pettitt and Dora Biro. Special issue of *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, Vol. 373; September 5, 2018.

[1]



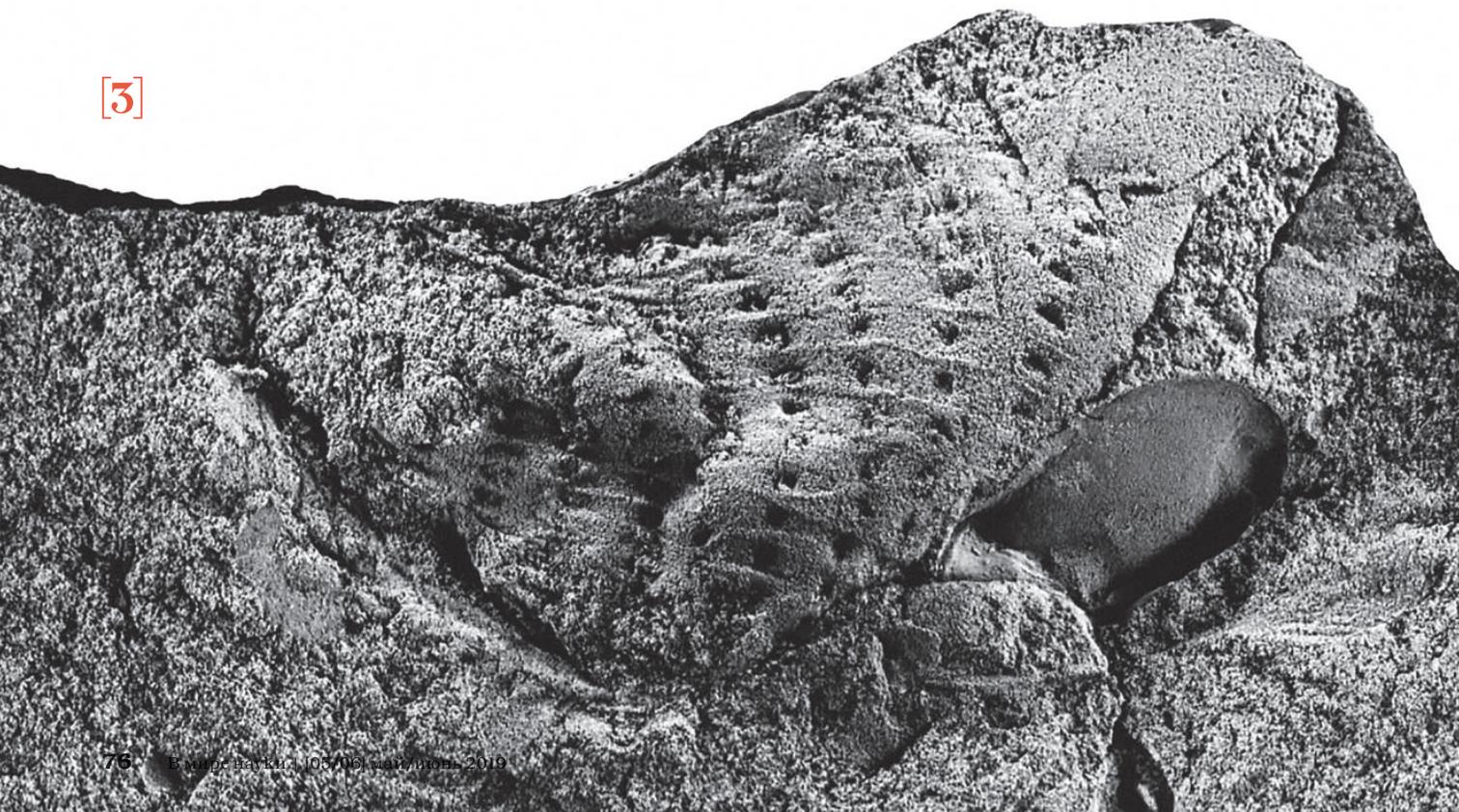
20 CM

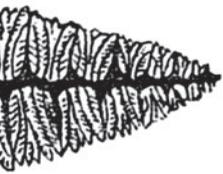
[2]



Мы знаем, что когда-то Земля была пуста и что в какой-то момент на ней зародилась жизнь. Но так ли это? О том, каким образом формировалась жизнь на нашей планете, почему древние организмы совсем не похожи на современные и почему жизнь неизбежна, — наш разговор с академиком **Михаилом Александровичем Федонкиным**, главным научным сотрудником Геологического института РАН, заведующим лабораторией докембрийских организмов Палеонтологического института РАН.

[3]





[4]



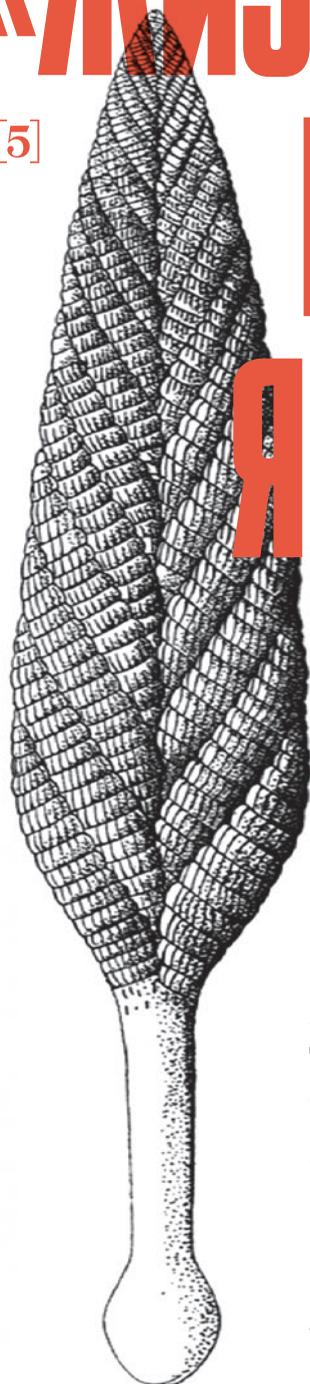
АКАДЕМИК М.А. ФЕДОНКИН:

«ЖИЗНЬ —

[5]

НЕИЗБЕЖНОЕ

ЯВЛЕНИЕ»



[6]



1. *Fractofucus*, о. Ньюфаундленд
2. *Tribrachidium heraldicum*
3. *Burykhia hunti* был описан как древнейший представитель класса асцидий (подтип *Urochordata*, тип *Chordata*, к которому относится и человек)
4. Слпок *Pteridinium nepoha* Keller, венд, Белое море
5. *Charnia* Ford, 555 млн лет назад, верхний венд, Белое море
6. *Ventogyrus*, фрагмент природного слепка, разломанного вдоль внутренней перегородки, Белое море

— **Михаил Александрович, вы — геолог и биолог в одном лице и всю свою жизнь в науке занимались темой происхождения животного мира нашей планеты. Наверное, загадок здесь уже не осталось?**

— Как раз осталось, и немало! Моя научная жизнь началась в этом институте, когда я студентом кафедры исторической геологии геологического факультета МГУ поехал в экспедицию в Якутию. Вместе с геологами из этого института мы проплыли от верховьев Лены до самых ее низовьев. Наш геологический отряд, в который входили профессор Б.М. Келлер и доктор геологических наук И.Н. Крылов, мои учителя, прошел через множество удивительных мест, где в долине этой великой реки местами обнажены весьма древние горные породы. Именно там меня ввели в тему ранней истории Земли. Эта тема была тогда новой не только для меня. Про историю жизни в так называемом протерозое мало кто знал. Это был малоизвестный в то время отрезок истории жизни на нашей планете.

— **И в университете вам об этом не рассказывали?**

— Мало рассказывали. В исторической геологии очень неплохо изучены последние полмиллиарда лет. Этот период называется фанерозоем — временем явной жизни. А вот предшествующие 3 млрд называются криптозоом. Это время скрытой жизни.

— **Почему же она была скрыта?**

— Дело в том, что фанерозойские отложения, которые начинаются с кембрийского периода, буквально наполнены окаменелостями, остатками различных морских организмов — фауны, флоры, простейших и т.д. А вот когда мы опускаемся ниже по этой последовательности земных слоев, то видим более древние толщи. И к удивлению всех, кто изучал этот интервал геологической летописи (а это удивление длилось века), переход от кембрийских отложений в более древние толщи сопровождался утерей какой бы то ни было палеонтологической информации. Точнее, ее просто не видели, не могли обнаружить. Эта проблема мучила Чарльза Дарвина. Для него это был совершенно необъяснимый факт, поскольку он придерживался концепции постепенного эволюционного развития от предков к потомкам. И вдруг — провал. Как обрезано.

— **Это, видимо, был удар по его теории эволюции?**

— Совершенно верно. Поэтому Дарвин сочувственно относился к суждениям геологов, в том числе Чарльза Лайеля и других, о неполноте



Академик М.А. Федонкин

геологической летописи. Они объясняли отсутствие палеонтологических свидетельств жизни ниже кембрийских отложений тем, что древние толщи уничтожались эрозией, изменялись процессами метаморфизма. В истории накопления осадков были и длительные перерывы при высоком стоянии суши материков и низком уровне моря. Они предполагали, что более древние организмы могли быть мелкими, без твердых частей тела. Такие делались суждения о причинах неполноты геологической летописи криптозооя. Она действительно крайне неполна. В ней много пробелов разной природы. И на момент выхода книги Дарвина «Происхождение видов» в 1859 г. эта ситуация казалась неразрешимой.

Но в дальнейшем стали появляться первые находки окаменелостей в докембрийских отложениях. Сначала на Ньюфаундленде еще в конце XIX в. нашли дисковидные отпечатки, потом в Намибии (Южная Африка) обнаружили очень странные крупные слепки неясной природы. Это было уже начало XX в. Потом — находки в Южной Австралии, где в середине прошлого века начались серьезные исследования. Интересно, что эти первые находки древних окаменелостей, совсем непохожих на известных кембрийских животных, сначала считались кембрийскими. В сложные формы жизни в докембрии никто не верил.

— **А в России что-то находили?**

— Да, геологи находили единичные отпечатки в керне глубоких скважин и в естественных обнажениях протерозоя Белого моря в Сибири. Множество дисковидных слепков было известно из древних толщ Украины, в тех местах, где они выходят

на поверхность в районах тектонических поднятий. Ведь земная кора, можно сказать, дышит — она всегда подвижна, и эти процессы подчас циклически обратимы. Есть формы поднятий, когда две континентальные плиты сходятся и, вздымая древние толщи, выводят их на поверхность.

— Какого типа эти находки? Что это за существа?

— Первое, что казалось странным, — те окаменелости, которые находили тогда, оказались совсем не крошечными, как думали до этого. Размеры их были вполне ощутимыми — до 30 см и больше. Потом оказалось, что среди них встречались и двухметровые существа. Второе, что удивляло, — эти окаменелости не имели никаких следов минерализованных частей: ни панцирей, ни костей, ни зубов, ни раковин. Это были явно отпечатки каких-то пластичных, эластичных организмов.

— Черви?

— И черви, и медузы, и так называемые морские перья — так их тогда интерпретировали. Внешне они очень напоминали некоторых современных животных. Причем они неплохо сохранились. Видны были морщинки смятия, причудливые деформации, которые присущи только мягкому телу. Все это говорило о том, что это были какие-то бесскелетные организмы. Если же говорить о скелете, то он мог быть только гидростатическим, когда морская вода или полостные жидкости поддерживают форму тела и тургор.

Но первая реакция: вот, нашли мы все-таки предков! И первые палеонтологические описания однозначно указывали, что мы имеем дело с животными. Да, они странные. Они действительно мягкотелые, без следов минерализации. Их относили к существующим ныне классам кишечнополостных — к тем же медузам или мягким кораллам, к аннелидам (это кольчатые черви). Некоторые формы относили к предкам членистоногих. Попытка привязать их к уже известным нам типам животных казалась весьма естественной. Именно таким путем несколько десятилетий шло исследование этих ископаемых организмов. Но по мере изучения новых обширных коллекций накапливались противоречия, которые не позволяли относить их к известным нам классам и типам животных. Оказалось, что у них необычные черты, необычная симметрия, которая не так часто встречается в животном мире. У них иные способы роста, морфология, форма, анатомия...

— То есть это другие?

— Другие, да. Сейчас мы знаем, наверное, более 300 их видов. Выделение нового вида или рода — всегда процесс непростой, потому что организмы могут быть и очень маленькими, и большими, сложными, и сохраняются они разными способами. Например, есть организмы, у которых сохраняется прикрепительный диск. Он сидит глубоко

в осадке. Есть также стебель и огромное перо, по форме напоминающее папоротник. И могут сохраниться отдельно этот диск, отдельно перо. Может сохраниться слепок внутренней полости и отпечаток поверхности тела. Зачастую мы имеем дело с разными частями, которые описываются отдельно. Не всегда удается связать эти описания и понять, что они принадлежат одному виду. Однако когда мы собрали все эти новые знания воедино, возникла совершенно парадоксальная картина. Ощущение, что мы прилетели на нашу планету 550 млн лет назад — и ее не узнали.

— Как на машине времени?

— Да, и это было удивительно, потому что совершенно расходилось с нашими предыдущими представлениями. Мы «увидели» огромные моря на разных континентах, которые в то время располагались не так, как сейчас. И там мы могли бы наблюдать формы жизни крупные, явные, весьма сложные по своей морфологии, но ничего общего не имеющие с современными. Мы ничего не знаем ни об их предках, ни о потомках, потому что подобные организмы ни в кембрии, ни далее не встречаются.

— Выходит, название «скрытая жизнь» не так уж верно?

— Да, она была скрытой от нас, но на самом деле оказалась явной. Поэтому и сам этот термин начал разрушаться. Это была сложная, разнообразная жизнь. Конечно, первые миллиарды лет — это преимущественно бактериальная жизнь. Но уже где-то 1,5 млрд лет назад начали появляться первые организмы, видимые невооруженным глазом. Например, я описывал в США и Австралии организмы из отложений, жившие 1,5 млрд лет назад, которые напоминают ожерелье, — это так называемая хородиския. Она похожа на нить, на которой нанизаны бусины. Такие организмы тысячами разбросаны под ногами, когда идешь по песчанкам. Это бывшее дно древнего моря. Удивительное чувство, когда идешь по этой поверхности и видишь отпечатки морской ряби и эти ожерелья, существа, которые когда-то здесь жили, росли, питались, а потом почему-то исчезли. Возможно, это был один из первых экспериментов живой природы, попытка выйти в большой размер, в многоклеточность. И такие попытки предпринимались, наверное, неоднократно.

— Но что-то пошло не так?

— Видимо, да, и эти организмы вымерли. Но жизнь продолжалась, и довольно сложная. Мы пока очень мало о ней знаем. Эти позднепротерозойские мягкотелые организмы сейчас называют «вендобионты». Они появились в самом конце протерозоя. Период, который непосредственно предшествовал кембрию, называется вендским периодом. Наш соотечественник академик Б.С. Соколов фактически обосновал существование такого

периода, предшествующего фанерозою. Тогда на многих континентах сформировались обширные моря, как, например, в европейской части России. Это море покрывало всю сушу, судя по осадкам, которые прослеживаются от Кольского полуострова до Черного моря. Мы видим эти отложения с помощью скважин и естественных обнажений. Под Москвой эти отложения могут быть на глубине 2 км. Но они выходят на поверхность вблизи Кольского полуострова по Белому морю. Они есть и в восточной части европейского фрагмента России на Урале.

— **Это был период наступления морей на континенты?**

— Да, мы называем это периодом трансгрессии, которая была связана прежде всего с тем, что таяли гигантские ледники. Дело в том, что вендскому периоду предшествовал период, который сейчас называется криоген. Это период начался приблизительно 800 млн лет назад и закончился где-то около 650 млн лет назад. В этом интервале было зафиксировано четыре или пять крупных оледенений. Последнее из плейстоценовых оледенений, валдайское оледенение, завершилось около 12 тыс лет назад, и оно было не самым крупным. Были и такие, что льды доходили до широты Полтавы. Там до сих пор находят бивни мамонтов. Но те оледенения, которые предшествовали вендскому периоду, были гораздо серьезнее. Их следы мы находим на всех континентах.

— **Что это за следы?**

— Мы видим особый тип отложений, когда ледники, как бульдозеры, идут с севера на юг, все стирая на своем пути. В эти льды вморожены огромные глыбы горных пород, которые стирают другие породы. Когда ледник отступает и тает, мы видим эти камни. Они похожи на гигантские утюги с отшлифованными боками. Есть следы, которые указывают на оледенения в морских отложениях, где толщи не возмущены штормами. И вдруг ты видишь камень, который прошел, как бомба, сквозь

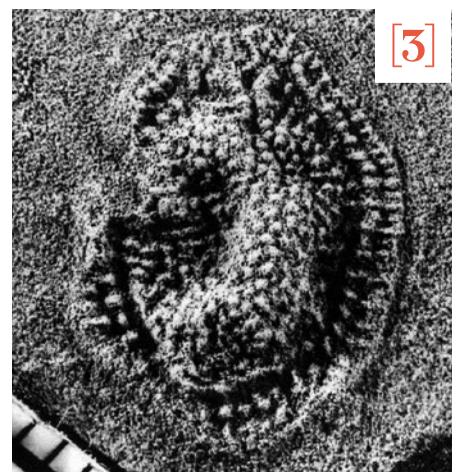
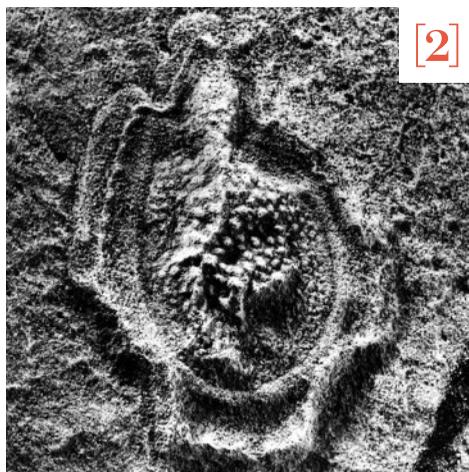
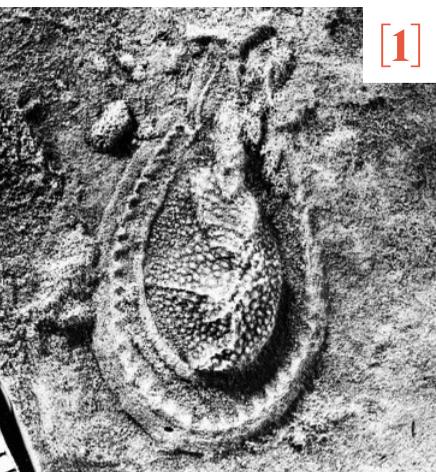
осадок. Это ледники таяли, айсберги уходили в океан, из них вытаивали камни и падали на морское дно. Это тоже сигнал, что океан был холодным. У нас в Геологическом институте много лет работает профессор Н.М. Чумаков. Он всю жизнь занимается проблемой формирования древних оледенений, очень много сделал для того, чтобы описать историю этих процессов, которые предшествовали взрыву жизни в вендском периоде.

— **То есть в то время, когда наступали эти гигантские оледенения, всех этих древних организмов еще не существовало?**

— Видимо, нет. Ряд специалистов полагают, что в те времена Земля напоминала снежный ком. Ледники доходили до экватора. Есть сторонники гипотезы о том, что Земля замерзала целиком, и не раз. Бактериальная жизнь, конечно, существовала. Но фотосинтез на какое-то время останавливался. А если нет фотосинтеза, значит и кислород не вырабатывается. Но, скорее всего, все-таки в океане оставались значительные участки, куда солнечный свет проникал и где фотосинтез существовал. У нас нет сигналов, что жизнь совсем прекратилась.

— **Она все время каким-то образом поддерживалась?**

— Да. Были оледенения, потом ледники отступали, но климат все еще оставался прохладным во многих местах. И это, наверное, пошло на пользу формированию сложной жизни, а может быть даже спровоцировало взрыв жизни в вендском периоде. Дело в том, что холодные воды отличаются от теплых тем, что в них растворяется больше кислорода. Это на руку аэробным организмам, которые дышат кислородом, — так называемым эукариотным одноклеточным. И еще одна очень важная вещь: в холодном океане вся толща воды холодная. Вблизи наших полярных областей мы это видим. И там океану ничто не препятствует перемешиваться. Поэтому отмершие части организмов, отходы жизнедеятельности, продукты



фильтрации — все это падает на дно. Но все это окисляется течениями и снова выносится на поверхность. Это нутриенты для фитопланктона — основы пищевой пирамиды. Холодные воды отличаются высокой продуктивностью. А вот теплый океан, который предшествовал этому ледниковому периоду криогена, очевидно, сдерживал развитие высокоразвитой жизни.

— **Казалось бы, должно быть все наоборот.**

— А вот и нет. В теплом океане — следующая картина. Верхний слой, прогретый солнцем, имеет относительно высокую температуру. Нижний слой, куда не доходит солнце, — низкую. Таким образом, возникает стратификация, то есть он не перемешивается. И это значит — все, что захороняется на дне, даже на мелководных участках, остается там. Это голодный океан, который нуждается в жизни фитопланктона, но не способен ее кормить. Так что именно холодный океан дал толчок жизни.

— **Михаил Александрович, но сейчас, как известно, благодаря антропогенному фактору температуры растут, воздух, как и океан, нагревается. Может быть, это говорит о затухании жизни?**

— Роль человека здесь надо выяснять, это все-таки спорный вопрос. Природные процессы продолжают играть немалую роль в изменениях климата. Не только на суше, но и в океане, в рифтовых долинах идет активная вулканическая деятельность, выделяются гигантские массы двуокиси углерода и других парниковых газов. Периоды потепления и похолодания были всегда, и когда мы изучаем древние оледенения, мы понимаем: это был циклический, естественный процесс. Такое колебание весьма характерно для истории планеты. Общий тренд сейчас — действительно повышение температуры. Но при этом существуют колебания погоды. Поэтому я бы не стал однозначно утверждать, что человечество перегрело планету и это стало угрозой для жизни.

— **Вы не видите такого риска?**

— Конечно, опасность есть. Ведь существуют куда более опасные парниковые газы, чем углекислый газ, — метан, например. Но смотрите, какая парадоксальная вещь. С потеплением климата увеличивается объем осадков, включая снег. Его так много, что вечная мерзлота медленнее оттаивает в начале лета в полярных областях.

— **То есть природа все время придумывает какие-то шаги для самосохранения?**

— Похоже, это так.

— **Как вы думаете, те древние организмы, которые почему-либо вымерли на Земле, могли продолжать свое развитие на какой-то другой планете?**

— В принципе, если это существует на Земле, значит возможно и где-то еще. Жизнь — это не случайное явление. Она неизбежна. Существуют процессы самостоятельного усложнения материи, ведущие к формированию все более сложных соединений и структур. Физики называют это неравновесностью. Скажем, если вы сделаете наклон, вода потечет вниз. Поставите плюс и минус — пойдет электрический ток. Эти вещи, создающие градиент, всегда существовали в природе. Они вызывают поток энергии или вещества. И вот этот поток сам по себе может формировать упорядоченность и высокую сложность. Я всегда привожу пример, который меня глубоко трогает. Этот образ, который показывает, что такое жизнь, оставил нам Жорж Кювье. Он был палеонтологом, занимал высокие должности при Наполеоне. И он сказал, что живой организм подобен смерчу или торнадо. Оно имеет определенную форму, как многие организмы, — коническую. Оно движется, растет, как все организмы, вбирает в себя и выбрасывает. Оно может даже делиться. Но это «существо» живет, только пока дует ветер. Вот это — суть жизни. Еда, дыхание, питание, обмен веществ для нас — тот самый «ветер».

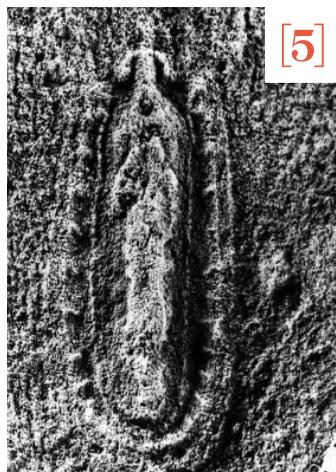


Фото 1–3.

Kimberella: отпечаток раковины и мягких частей тела. Вендский период, 555 млн лет назад. Судя по скульптуре поверхности, раковина была органической и имела минеральные склериты.

Фото 4–5.

Kimberella: слепки мягкого тела, билатеральная структура на верхнем конце интерпретируется как хоботок и пара желез (Fedonkin, Simonetta, Ivantsov, 2007).

— **Иначе говоря, если создается комплекс условий, то жизнь неизбежна? И она всегда усложняется?**

— Совершенно верно. Она начинается на атомном, на молекулярном уровне в разных условиях, но всегда идет по пути усложнения. Но мы начали наш разговор с животных. Посмотрите, как много потребовалось первым животным — почти 3 млрд лет, чтобы возникнуть из ничего. Видите, какова цена высокой сложности и как непроста эта история! Среди этих существ, о которых мы говорим, пока известны только морские животные. Мы ничего еще не знаем о жизни на суше. Мы описывали и по-новому интерпретировали удивительных животных — кимбереллу, например, которая во многом напоминает моллюсков. Это билатеральные животные, у них был некий хоботок, с помощью которого они питались на бактериальных матах. Эта статья была опубликована в *Nature*. Потом мы определили возраст отложений с этими окаменелостями, и кимберелла стала древнейшим видом билатеральных многоклеточных животных, который используют для калибровки молекулярных часов (это метод сравнительной геномики, позволяющий реконструировать эволюционные события и филогенетические связи). Статья об этом вышла в *Science*. Сейчас мои коллеги И.М. Бобровский и А.Ю. Иванцов с соавторами напечатали статью, которая также опубликована в *Science*: на примере вендской дикинсонии они доказали, что эти существа содержат липиды, свойственные только животным. Эта статья цитировалась в числе главных достижений естествознания года, потому что была подтверждена идея о том, что мы имеем дело с древнейшими животными.

— **А до этого сомневались?**

— Да, было много гипотез, которые уходили от животной природы этих существ. Одни полагали, что это вымерший тип совсем неизвестно чего. Другие говорили, что это водоросли. Третьи — что это лишайники, симбиоз грибов и водорослей или цианобактерий. Четвертые — что это гигантские многоядерные одноклеточные. Эти споры будоражили научную общественность много лет. А тем временем шла большая систематическая работа, ежегодные экспедиции. Мои первые экспедиции на Белое море были отсюда, из Геологического института. Сейчас наша лаборатория докембрийских организмов в Палеонтологическом институте проводит экспедиции на Белом море, в Сибири, на Урале, не раз бывали с полевыми работами в Намибии, Австралии и других странах. Но, конечно, самое уникальное — это по-прежнему Белое море. Там на протяжении береговой линии более 400 км выходят древние толщи, где отпечатки такой сохранности, что можно ставить изучение биохимии этих существ. В работах А.Ю. Иванцова

показано, что они могли передвигаться, оставляли следы, ползали. Мы находим массу следов питания. Все это вместе складывается в картину довольно разнообразного животного мира. При этом, повторюсь, основная часть этих существ — не наши предки.

— **Михаил Александрович, а как вам нравится гипотеза о том, что некоторые динозавры могли быть разумными?**

— Ну, если есть мозг, должен быть и разум.

— **Неожиданно! А древние животные, о которых мы сегодня говорим, могли что-то соображать?**

— Ну вот смотрите. У современной медузы по краю зонтика есть много таких «глазок». Мы с вами смотрим глазами, а видим мозгом. Мы слушаем ушами, а слышим и расшифровываем мозгом. У медузы нет мозга, но есть глаза. Как она их использует? Как она обрабатывает информацию? На 97% она состоит из воды, это желеобразное существо. Мои коллеги исследовали полуизолированную экосистему кальдеры, в которой живет множество медуз. Стенки там довольно высокие, солнце туда заглядывает косо, оно движется, а ткани медуз наполнены симбиотическими водорослями, которым нужен солнечный свет. Они сами — фактически фотосинтетички. И эти медузы все время мигрируют всей своей толщей за солнечными лучами. Вот разум это или нет?

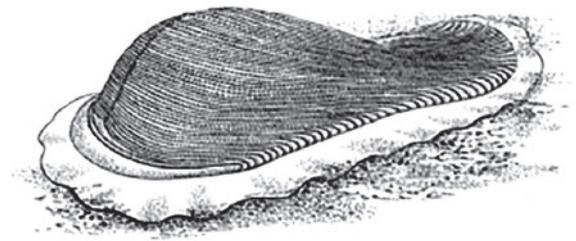
— **Станислав Лем создал мыслящий океан. Чем он соображает, неизвестно.**

— Сейчас рассказывают о кооперации в мире бактерий и архей. Это наиболее примитивные существа, но у них действительно довольно сложные отношения. Там есть и конкуренция, и кооперация, и то, что можно было бы назвать обманом, хитростью, коварством. Это удивительно. Это сложное сообщество из разных культур с очень пластичным геномом, обеспечивающим обмен веществ между разными членами этого сообщества. Много поразительного можно сказать про муравьев и пчел. Говорят, что это рассеянный мозг. Как пчела, например, передает своим коллегам по улью, где можно взять нектар? Она прилетает и на вертикальной стенке рисует знак, а другие пчелы внимательно наблюдают. И вот положение этого знака, в котором учитывается земное тяготение, как-то обозначает азимут, дает им понять, куда лететь. Понимаете?

— **Не очень.**

— Вот именно. А танцы пчел, с помощью которых они тоже передают информацию? Поэтому, когда мы говорим о разуме, надо понимать, что он может иметь очень разные проявления.

— **Вы рассказали о животных, которые не были нашими предками. Может быть, через несколько миллионов или миллиардов лет новые жители Земли найдут наши останки**



Andiva ivantsovi, отпечаток и реконструкция

и будут гадать, были мы существами животного происхождения или нет. А может быть, мы водоросли или лишайники?

— Возможно, такое будет в какой-то длительной перспективе. Геологические летописи весьма разнообразны. Все меняется, кроме бактерий или архей. Их называют самыми примитивными формами жизни, но при ближайшем рассмотрении они оказываются совсем не примитивными. Они сумели преодолеть все катаклизмы. Они живут в невероятных условиях — начиная от горячей воды и до высокой радиации. Они выдерживают экстремальные давления и сверхнизкие температуры. Они способны переключаться на разные типы питания, входят в симбиозы. Они не могут поглотить кого-то, как это делаем мы, но эта их, казалось бы, примитивность — залог выживания.

— Михаил Александрович, зачем нужно изучать историю древних организмов, тем более вымерших?

— Это чрезвычайно важно. Когда мы начали исследовать эту фауну, я был в командировке в США и ко мне подошел биолог, который спросил: «Послушай, а глаза у них были?» Я говорю: «Ты знаешь, пока не установлено. А почему ты спрашиваешь?» Оказывается, они занимались происхождением

родопсина, основного зрительного пигмента, который ответственен за восприятие света. И выяснение, когда сформировалось то или иное вещество, тот или иной орган, чрезвычайно важно во многих отношениях. Чем древнее тип молекулы, тем прочнее ее место на древе жизни. Это трогать нельзя — все рухнет. Потому что организм — это предельно связанная система. Тронешь одно — потревожишь все остальное. Нужно быть чрезвычайно осторожными с этими вещами. Нужно знать их историю, тогда поймешь смысл жизни, как говорил И.А. Бродский. Смысл не только философский, но и сугубо практический, утилитарный.

В палеонтологии и в геологии, в стратиграфии отпечатки животных служат знаком времени. Эволюция необратима. И в этой ископаемой летописи мы видим, что разнообразие то растет, то гаснет, то мы наблюдаем массовые вымирания. Но в целом виды сменяют друг друга. При этом каждый вид представляет собой индекс определенного периода. Пока не было изотопных методов датирования горных пород, у нас существовала относительная геохронология. Более века назад появилось изотопное датирование, которое сейчас активно развивается. Мы извлекаем минералы, которые содержат радиоактивные элементы, их дочерние продукты, и по их соотношению измеряем возраст. Таким образом окаменелости получают датировку, исчисляемую в годах. В практической геологии это чрезвычайно важная вещь.

Для нас важны еще биогеография и палеобиогеография. Вот, допустим, до каких-то пор животный мир Южной Америки и Африки был однородным, пока это был один континент. А как только они разошлись, начала работать изоляция — и эволюционные пути пошли по-разному. Сегодня мы используем органические остатки для того, чтобы реконструировать палеогеографию, то есть географию планеты миллионы и миллиарды лет назад. Мы видим, как Земля была заселена видами в разное время. Это позволяет нам реконструировать положение континентов и находить подчас очень важные вещи — в том числе и для практической, прикладной науки. ■

Беседовала Наталья Лескова



НЕПРИЗНАННАЯ БОЛЕЗНЬ

ПСИХИАТРИЯ

**У СОТЕН ТЫСЯЧ
ЛЮДЕЙ БЫВАЕТ
МАНИЯ И НИКОГДА
НЕ БЫВАЕТ ДЕПРЕССИИ.
ПОЧЕМУ ПСИХИАТРЫ
НАСТАИВАЮТ, ЧТО
ЭТО НАДО НАЗЫВАТЬ
БИПОЛЯРНЫМ
РАССТРОЙСТВОМ?**

Саймон Макин

КОГДА В ОКТЯБРЕ 1997 Г.

в возрасте 58 лет Дэвид Хо (David Ho) слушал запись Баха, он испытал необычные ощущения. «Я начал танцевать и изображать, что дирижирую, — рассказывает он. — При этом мне казалось, что я не двигаюсь под музыку, а создаю ее. Я погрузился в бессознательное состояние, как в транс. Мой разум взорвался. Вспышки прозрения шли потоком, и я видел красоту повсюду, в лицах, в живых существах и в космосе. Я стал раскованным, непринужденным и свободным».

Хо оказался во власти своего первого приступа мании. То, что он описывает, похоже на всплеск творческой энергии, которому можно позавидовать, однако среди симптомов мании встречаются также и чрезмерная уверенность в своих возможностях, бред величия, скачущие мысли, крайняя болтливость, снижение потребности во сне, повышенные активность и возбуждение, неосторожное поведение, бредовые идеи и другие психотические явления. Тяжелые приступы могут ухудшать повседневную деятельность, иногда настолько, что требуется госпитализация.

Пожалуй, самое удивительное в таких случаях то, что для психиатров мания не существует в чистом виде, как отдельное состояние. Манию обычно считают фазой биполярного расстройства. У большинства людей она чередуется с периодами депрессии. Но у Хо начиная с 1997 г. было 20 эпизодов мании и ни одного — депрессии. И такая же ситуация у тысяч людей в США. Однако пациентов с манией в отличие от имеющих только одну депрессию объединяют с теми, у кого расстройство имеет биполярную форму. При этом психиатры оказываются в странном положении, утверждая,

ОБ АВТОРЕ

Саймон Макин (Simon Makin) — независимый научный журналист из Лондона.



что депрессия сама по себе отличается от депрессии вместе с манией, а мания не отличается.

Многие психиатры признают существование униполярной мании, но идут споры о том, достаточно ли она отличается от биполярного расстройства, чтобы имело смысл выделять ее как отдельное заболевание. Это спор о том, что лучше — выделять небольшое число широких категорий или же много, но узких. При этом отсутствие точного диагноза может иметь последствия для пациентов: в некоторых исследованиях выявлено, что люди с униполярной манией могут иначе реагировать на лечение. Если правы те ученые, которые предполагают, что униполярная мания и биполярное расстройство отличаются своими биологическими механизмами, выделение мании как отдельного расстройства ускорит разработку новых путей лечения, более персонализированных и эффективных. Но поскольку униполярная мания встречается гораздо реже, чем биполярное расстройство, исследования данного состояния оставались немногочисленными и неоднозначными.

Хо заинтересован в изучении этой темы, поскольку он одновременно и пациент, и клинический психолог. В 2016 г. он опубликовал в журнале *Psychosis* самоисследование, перечислив свои симптомы, среди которых были усиление памяти, повышение эмпатии и духовные переживания. Он страдал от некоторых болезненных последствий, таких как сильная усталость и замешательство, и его поведение могло вызвать беспокойство у друзей и коллег: однажды во время чтения лекции он расплакался. Но его профессиональная подготовка помогла ему контролировать свои порывы и избежать бредового мышления. Он считает, что это

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- При биполярном расстройстве мания обычно сочетается с приступами депрессии. Однако у некоторых пациентов биполярное расстройство проявляется только в форме мании, поэтому возникает вопрос, не нужно ли использовать для них другой диагноз.
- Ранее не было четких данных, позволяющих отделить униполярную манию от биполярного расстройства, но сейчас начали появляться исследования, где показано наличие значимых различий.
- Некоторые ученые рекомендуют официально выделить униполярную манию в качестве подтипа биполярного расстройства, чтобы повысить осведомленность общества и облегчить дальнейшее исследование особенностей этой формы заболевания.

так называемое безумие в итоге не повредило его жизни, а обогатило ее. «Я знаю, что мой случай, вероятно, нетипичен, — говорит Хо. — Это вызов принятым в психиатрии убеждениям, не признающим положительного влияния психических расстройств».

Современные представления о заболевании

Считается, что современные представления о биполярном расстройстве сформулировал в XIX в. французский психиатр Жан-Пьер Фальре (Jean-Pierre Falret). Он назвал заболевание *folie circulaire*, то есть «циркулярным психозом», из-за периодов патологически приподнятого либо подавленного настроения, обычно отделенных друг от друга периодами без симптомов, имеющими разную длительность. Эти представления утвердились к началу XX в., когда отец современной психиатрии Эмиль Крепелин (Emil Kraepelin) сделал предположение, имеющее большую историческую значимость.

В то время в психиатрии выделяли так называемые реактивные психозы, которые рассматривались как реакция на внешние события, и эндогенные психозы, которые считались врожденными. Крепелин разделил эндогенные психозы на две обширные группы: *dementia praecox* (раннее слабоумие), теперь это называется шизофренией, и маниакально-депрессивный психоз, который теперь называют биполярным расстройством. Таким образом, эндогенная депрессия рассматривалась как форма маниакально-депрессивного психоза. Все мании попадали в ту же категорию, поскольку считалось, что они никогда не возникают в ответ на внешние события. Были несогласные: в частности, известный немецкий невролог Карл Вернике (Carl Wernicke) полагал, что мания связана с чрезмерным нервным возбуждением, а депрессия — со сниженной нервной активностью. Но представления Крепелина преобладали и сохранились и в сегодняшней системе диагностики.

Вопрос о том, что считать биполярным расстройством, вновь возник в 1966 г. Независимо друг от друга психиатры Карло Перрис (Carlo Perris) из Университета Умео в Швеции и Жюль Ангст (Jules Angst) из Цюрихского университета изучили каждый порядка 300 пациентов с биполярным расстройством или только с депрессией и более 2 тыс. их близких родственников.

Оба исследователя обнаружили, что у родственников биполярных пациентов было больше аффективных расстройств, чем у родственников чисто депрессивных пациентов. Выяснилось также, что у родственников депрессивных пациентов биполярное расстройство встречалось с той же вероятностью, что и в среднем по популяции, хотя среди родственников биполярных пациентов оно встречалось чаще. На основе этих данных Перрис

и Ангст пришли к выводу, что биполярное расстройство и депрессия — генетически разные заболевания.

Как следствие, когда в 1980 г. появилось третье издание «Диагностического и статистического руководства по психическим расстройствам» (*DSM*), большое депрессивное расстройство оказалось там отдельно от биполярного. Исследования Перриса и Ангста были сосредоточены на депрессии и не коснулись мании. Ангст рассказывает: «Не было достаточного количества случаев чистой мании, чтобы делать обоснованные предположения».

Вопрос о том, надо ли считать униполярную манию отдельным диагнозом, усложняется разнообразием клинических проявлений биполярного расстройства. Маниакальная и депрессивная фазы могут быть разной тяжести и по-разному преобладать одна над другой. Особенности эпизодов заболевания непредсказуемо варьируют от пациента к пациенту. Иногда встречаются также смешанные состояния, когда одновременно проявляются элементы противоположных настроений. На самом деле многие психиатры считают, что аффективные расстройства лучше всего рассматривать как целый спектр, от большого депрессивного расстройства через биполярное и к чистой мании.

В поисках подтипа

Из-за неоднородности симптомов и по результатам крупных психиатрических генетических исследований, в которых учитываются многие биологические факторы, можно предположить, что биполярное расстройство объединяет целый ряд немного различающихся состояний. «Спустя 50 лет интенсивных исследований мы все еще не вполне понимаем, что такое биполярное расстройство, и одна из причин в том, что оно рассматривается как единое заболевание, когда это, очевидно, не так», — рассказывает психиатр Пол Гроф (Paul Grof) из Торонтского университета.

Нежелание делить на подтипы может быть связано с изменениями финансирования исследований в последние несколько десятилетий: теперь все больше психиатрических исследований в университетах обеспечиваются фармацевтической промышленностью, рассказывает Гроф. Фармацевтические компании хотят просто убедиться, что новое лекарство лучше, чем плацебо, и чем больше группа пациентов, тем больше шансов найти достоверные различия. Разделение биполярного расстройства на более мелкие группы затруднило бы такие исследования. Кроме того, промышленность предпочитает работать с диагнозами, признанными Управлением по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (*FDA*) США, а униполярная мания в их список не входит.

Может играть роль и инертность официальной системы. Любое переписывание руководства *DSM* — трудоемкий процесс. За основу каждого последующего издания берется предыдущее, и любые изменения должны быть подкреплены свежими данными с представлением статей рабочим группам для обоснования решения. Последнее издание, *DSM-5*, было опубликовано в 2013 г. и, по решению рабочей группы, занимающейся рассмотрением аффективных расстройств, униполярная мания как разновидность биполярного расстройства была отнесена к диагнозам *BP-I*, содержащим манию с депрессией или без. «Надо ли выделять манию, почти не обсуждалось, поскольку начало и течение этого заболевания заметно не отличаются от *BP-I*», — рассказывает член рабочей группы *DSM-5* по аффективным расстройствам психиатр Триша Суппес (Trisha Suppes) из Стэнфордского университета.

Отсутствие отдельного диагноза может затруднять сбор данных. Стандартизированное интервью, используемое для диагностики по *DSM* при клинических исследованиях, не позволяет выявить униполярную манию, поэтому для изучения этого состояния приходится применять особые приемы, которые могут не совпадать в разных исследованиях. Таким образом, униполярная мания напоминает «уловку-22»: отсутствие диагноза препятствует исследованиям, а выделение диагноза маловероятно из-за недостаточного количества исследований.

В тех работах, которые все же проводятся, из-за отсутствия официального диагноза сложно сравнивать результаты. «Главная проблема — с определениями», — говорит психиатр из Королевского колледжа Лондона Аллан Янг (Allan Young). Один из поводов для разногласий — насколько тяжелыми должны быть симптомы, чтобы квалифицировать состояние как манию. Другая проблема —

Психическая подпитка для творческого мозга

Возможно, гениальное безумство — это не просто фигура речи

Вероятно, самый яркий образ творческой личности с психическим расстройством — гений в состоянии мании. Считается, что у многих культовых фигур начиная от Уильяма Блейка и Эрнста Хемингуэя и заканчивая Куртом Кобейном было биполярное расстройство. Такая связь интуитивно понятна: эйфория, неумная энергия и беспорядочность мысли дают мощную подпитку для творческого процесса. В то же время научных доказательств подобной связи почти нет.

Большинство сведений берутся из исторических источников, и речь идет об отдельных случаях. Современные методы удивительно мало сообщают о том, что происходит в нервной системе во время мании, отчасти потому, что для исследования мозга требуется не двигать головой, а этого сложно добиться от человека в выраженном маниакальном состоянии. Поскольку творчество — это динамический процесс, требующий взаимодействия многих систем мозга, его тоже сложно изучать.

Однако если сравнить исследования биполярного расстройства с рядом работ в области творческого мышления, то выявляется некоторая связь между этими двумя процессами. И творческое состояние «потока», и изменение работы мозга при биполярном расстройстве дают определенную когнитивную «расторженность».

У пациентов с биполярным расстройством с помощью томографических методов было показано снижение активности той части префронтальной коры, которая участвует в регуляции эмоций. Это может быть связано с ухудшением самоконтроля и скачками настроения. (Префронтальная кора в мозге выполняет функции дирижера, который управляет многими психическими процессами.) Некоторые исследования выявили ослабление активности и в тех областях мозга, которые отвечают за подавление спонтанных мыслей, возникающих как будто из ниоткуда, из области бессознательного.

Результаты напоминают исследования импровизирующих джазовых музыкантов и рэперов-фристайлеров, выполненные группой ученых под руководством нейробиолога Аллена Брауна (Allen Braun) в 2008 г. и в 2012 г., работавшего в то время в Национальных институтах здоровья. Тогда было обнаружено снижение активности в той части префронтальной коры, которая должна тормозить спонтанные мысли, и усиление в тех ее областях, которые входят в сеть пассивного режима работы мозга. Эта сеть возбуждается, когда человек не фокусируется на какой-то задаче, а просто что-то воображает или раздумывает о прошлом. Ученые считают, что наблюдаемые изменения отражают осла-

частота приступов. В некоторые исследования включают любого, у кого хотя бы раз был приступ мании, но не было депрессии, в других исследованиях требуется, чтобы маниакальных эпизодов было не менее трех-четырёх. А в некоторых нужнее, чтобы заболевание длилось не менее какого-то числа лет. Из-за таких различий сильно не совпадают и оценки распространения униполярной мании: по разным данным, среди пациентов с диагностированным биполярным расстройством она составляет от 1,1% до 65,3%.

Большинство завершённых на сегодня исследований имеют методологические проблемы. Как правило, используется ретроспекция, исследователи просто расспрашивают участников о пережитом

бление сфокусированного внимания и контроля, которое освобождает путь для творческого мышления, когда вдохновение всплывает из области подсознательного. Другие исследователи обнаружили уменьшение толщины серого вещества в некоторых областях коры в мозге творческих людей и людей с биполярным расстройством, что может быть связано с изменением нейронной активности и когнитивной расторможенностью.

Способность улавливать связи, недоступные другим, — еще одна общая психическая черта творческих людей и людей с манией. Нейробиолог Нэнси Андреасен (Nancy Andreasen) из Университета Айовы обнаружила, что у творческих людей выше активность в ассоциативных областях коры, которые отвечают за связи между разными элементами мышления. Эти области не предназначены для непосредственной обработки сенсорных сигналов или моторных команд, они нужны, чтобы связать, например, написанное слово с его произношением и значением. Андреасен считает, что, возможно, творческие идеи возникают, если мозг позволяет этим связям образовываться бесконтрольно во время бессознательной активности, когда все мысли ненадолго становятся хаотичными, а это весьма похоже на то, что происходит во время маниакального приступа.

Данное исследование перекликается с наблюдениями клинического психолога Дэвида Хо, который испытал беспорядочность мыслей и необычайное усиление памяти во время маниакальных эпизодов, благодаря чему он мог писать, не сомневаясь в себе и ничем себя не сдерживая. Он рассказывал: «Когда исчезло подавление, мой разум работал как единое целое. Креативные идеи возникали быстрее, чем я мог с ними справиться». Ученые пока не знают, выше ли активность ассоциативных зон коры в период маниакального состояния или нет, но все работы свидетельствуют, что появление во время творческого процесса новых комбинаций звуков, образов, воспоминания значений и чувств, скорее всего, сродни тому, что происходит во время мании.

Безусловно, психические расстройства — не необходимое и не достаточное условие для творческих способностей, а тяжелые приступы мании, вероятно, слишком изнурительны для любой длительной работы. Однако исследователи обнаружили, что родственники людей с биполярным расстройством — тоже в среднем более творческие, а следовательно, легкие проявления расстройства могут давать когнитивные преимущества.

Важно не создавать романтического ореола вокруг состояния, которое, как правило, вызывает тяжелые страдания, но доказательства, что мания может улучшить творческие способности у некоторых людей, полезны для уменьшения стигматизации этого диагноза. Хо говорит: «В достойной жизни можно иметь долю безумия, и, даже будучи безумным, можно сохранить достоинство».

опыте; известно, что при этом депрессия недооценивается, а величина мании, возможно, раздувается. Лучше проводить проспективные исследования, при которых пациентов наблюдают на протяжении многих лет и периодически оценивают их состояние. «На самом деле вам надо найти кого-то, у кого на протяжении всей жизни было много маниакальных эпизодов, но никогда не было депрессии, — говорит Янг. — Первая такая дама, которую я встретил, умерла, когда ей было уже под 70, ее первый маниакальный эпизод случился в 21 год, и эти приступы потом повторялись на протяжении 50 лет, так что этот случай был очень убедительным».

Одно из самых продолжительных исследований, начавшееся в 1978 г. и опубликованное

в 2003 г., проходило под руководством Дэвида Соломона (David Solomon), который сейчас работает в Медицинской школе Уоррена Альперта Брауновского университета. Первоначально это было исследование 229 пациентов с биполярным расстройством, у 27 из которых была мания без случаев депрессии. Исследователи наблюдали за пациентами на протяжении 20 лет, у семерых за прошедший период депрессии так и не проявилось. Это означает, что среди 229 пациентов униполярная мания встретилась у 3%. Соломон не считает, что униполярная мания должна быть отдельным диагнозом, если в дальнейших исследованиях не будет показано различий в механизмах возникновения, прогнозах или реакции на лечение. Однако если долю, обнаруженную в исследовании, экстраполировать на все население, то окажется, что в США униполярная мания примерно у 100 тыс. человек — и еще у сотен тысяч во всем мире.

При изучении историй людей с униполярной манией становится понятно, почему некоторые исследователи убеждены, что это отдельное заболевание. Один из таких примеров — история Линдси, тренера по лыжам из Портленда, штат Мэн. Первый маниакальный эпизод случился у нее в 18 лет. К 36 годам у нее ни разу не было депрессии, но ее диагнозом все еще значится биполярное расстройство.

«Из всех моих знакомых я самый счастливый человек, — рассказывает она. — Я никогда не была согласна со своим диагнозом». В результате она отказалась от лечения и у нее продолжали возникать эпизоды мании. Пять раз ее госпитализировали, не единожды она попадала в тюрьму.

Приступы у Линдси начинаются с эйфории, но затем могут появиться бред и нарушение речи. В маниакальном состоянии она не чувствует усталости, голода или боли. Один такой эпизод, случившийся незадолго до ее тридцатилетия, начался в Нью-Мексико во время похода; ей казалось,

что наступает конец света. Линдси позвонила своему отцу, он вылетел к ней и повез ее домой в Мэн. «У нее были лекарства, — рассказывает отец, — но она их просто не принимала». На ночь они остановились в Нашвилле, и рано поутру она начала играть на пианино в вестибюле отеля. Сотрудник вызвал полицию, и Линдси скрылась на автомобиле.

На этом приключения не закончились: она специально заблудилась, спрятала свои вещи рядом с железнодорожным полотном и бросила машину. Затем она прыгнула в товарный поезд, сошла с него посреди сельской местности в Теннесси, выбралась из окруженной скалами долины и забрела в часовню, где пастор сумел получить от нее достаточно точную информацию, чтобы связаться с ее семьей. Отец опять повез ее домой, и вскоре во время остановки она вновь от него убежала и начала собирать маргаритки на огороженном участке, где располагалось электрооборудование. Снова была вызвана полиция. И хотя офицер уговаривал ее поехать с отцом, она настаивала на аресте.

В камере охранник применил к ней перцовый баллончик, и она оказалась в кабинете у тюремного консультанта. В этот момент Линдси почти не могла говорить, но многократно писала слово «униполярный» на доске. Тогда консультант прочитал Линдси описание мании. Она считает, что именно во время этой встречи решила, что ей нужно принимать лекарства. Консультант дал ей антипсихотическое средство зипрексу (оланзапин). Ей стало лучше, и Линдси принимает препарат до сих пор, правда, с некоторыми сомнениями. «Мое лекарство — как порция печали, голода, усталости и боли», — рассказывала Линдси. Она пребывала в эйфории на протяжении всего своего приключения, даже когда в нее брызнули из перцового баллончика. Страдали только окружающие. «Мне кажется, это заболевание, делавшее меня такой счастливой, было благословением, — говорит Линдси, — но я ощущаю себя эгоисткой из-за того, как оно влияет на мою семью».

Линдси вышла замуж за журналиста Энди в 2015 г., вскоре после того, как он стал свидетелем ее последней госпитализации. «В конце концов это укрепило отношения, — рассказывает Энди. — Мне удалось увидеть ее, когда она пробиралась обратно к разуму. Это было потрясающе». Самый важный фактор в ее лечении — признает ли психиатр, что у нее не биполярное расстройство. «Если это игнорируют, она перестает доверять человеку», — говорит Энди.

Все становится реальным

У этого незамечаемого заболевания есть любопытная особенность: его распространенность по разным странам очень варьирует, и она неизменно более низкая в западных странах. Получив образование в Южной Африке, в 1997 г. психиатр

Кристоффель Гроблер (Christoffel Grobler) работал в отделении госпиталя в Ирландии, и там пациенты с биполярным расстройством были преимущественно в состоянии депрессии. Когда Гроблер вернулся в Южную Африку в 2009, он обратил внимание на противоположную ситуацию: большинство пациентов были в маниакальном состоянии. Чтобы изучить это обстоятельство, в 2010 г. он с коллегами расспросил 103 биполярных пациентов из трех больниц, используя стандартный диагностический опросник. 32% из них были определены как униполярные, у таких пациентов было как минимум пять маниакальных эпизодов в течение четырех или более лет. «Когда я представляю данную информацию на конференциях, люди подходят и говорят: это именно то, что мы все время наблюдаем», — рассказывает Гроблер.

Местные различия трудно интерпретировать, потому что тут играют роль культурные нюансы: например, в Южной Африке депрессия с большей вероятностью будет считаться вариантом нормы. Правила и работа систем здравоохранения неодинаковы, могут влиять и другие факторы, например инфекции или отравления. Но Гроблер убежден, что географические различия имеют генетические причины и, следовательно, униполярная мания — это отдельное заболевание.

Для того чтобы разобраться в этом вопросе, требуются обширные мультикультурные международные исследования. А пока ученые пытаются компенсировать недостаток данных. Одна из причин, почему в большинстве ранних исследований не обнаружилось различий между манией и биполярным расстройством, может заключаться в том, что различия столь незначительны, что достоверно выявить их можно только при больших выборках. Ангст недавно попытался решить эту проблему, хотя сейчас ему уже за 90, он объединил данные девяти эпидемиологических исследований, проведенных в США, Германии, Швейцарии, Бразилии и Голландии. Исследование было опубликовано онлайн в журнале *Bipolar Disorders* в ноябре 2018 г. Там показано, что среди людей с униполярной манией чаще встречаются мужчины, такие пациенты реже предпринимают попытки самоубийства, реже употребляют наркотики или имеют проблемы пищевого поведения. Ангст с коллегами утверждают, что на основании этих результатов следует необходимость признать униполярную манию отдельным диагнозом.

Некоторые из этих выводов совпадают с трендами обзорами исследований униполярной мании, опубликованными в течение последних пяти лет. Во всех трех показано, что униполярная мания реже сопровождается тревожностью (которая часто встречается вместе с депрессией), но чаще — психотическими симптомами. Униполярная мания также, по-видимому, дает меньше нарушений

социальной сферы, меньше рецидивов и имеет лучшие показатели ремиссии по сравнению с биполярным расстройством.

Вероятно, самое главное — то, что люди с униполярной манией немного иначе реагируют на лекарства, используемые для профилактики. В трех исследованиях показано, что на пациентов с униполярной манией по сравнению с биполярными пациентами хуже действует литий (стабилизатор настроения и препарат первого выбора при биполярном расстройстве).

В последнем из этих исследований, опубликованном в 2012 г. учеными из Стамбульского университета Олджаем Язычи (Olcaу Yazici) и Сибелом Чакиром (Sibel Cakir), рассматривался вопрос, не представляет ли собой униполярная мания просто биполярное расстройство, смещенное к маниакальному концу спектра (это называется «доминирование маниакальной полярности»). Они разделили 121 пациента на две группы: 34 человека были с униполярной манией и 87 — с классическим биполярным расстройством. Так же, как и в предыдущих исследованиях, пациенты из униполярной группы слабее реагировали на литий, при этом их реакция на другое, часто используемое при биполярном расстройстве лекарство, антиконвульсант депакот (дивальпроат натрия), не отличалась от биполярной группы.

Затем исследователи разделили на две группы всех пациентов в соответствии с тем, какие эпизоды преобладали, маниакальные или депрессивные, а потом выделили тех, у которых маниакальных эпизодов было не менее 80% от общего числа. Среди пациентов с преобладанием маниакальных эпизодов меньше людей реагировали на литий по сравнению с теми, у кого преобладали депрессивные эпизоды. А для пациентов, у которых более 80% приступов были маниакальными, это различие было выражено еще сильнее. Показательно, что когда из анализа исключили людей с униполярной манией, различия исчезли: это означает, что разница была связана с униполярной манией, а не со смещением к маниакальному концу спектра, а следовательно, униполярная мания — отдельное заболевание.

Путь вперед

Ученые, выступающие против разделения диагнозов, иногда указывают, что мании при униполярной мании и при биполярном расстройстве неотличимы друг от друга. Но это же верно и для депрессии, в то время как во многих исследованиях показаны различия большого депрессивного и биполярного расстройств на уровне мозга. Дальнейшая работа, в которой будут сравниваться особенности мозга людей с униполярной манией и биполярным расстройством, может получиться не менее показательной.

Биологические исследования униполярной мании, содержащие нейровизуализацию, очень редки. Но одно из них, проведенное четверть века назад, свидетельствует о наличии физиологических различий. В 1992 г. в исследовании с помощью компьютерной томографии, проведенном Сукдехом Мукерджи (Sukdeb Mukherjee) из Медицинского колледжа Джорджии при Университете Огасть, было показано, что в мозге у пациентов с униполярной манией меньше размер третьего желудочка (это одна из четырех взаимосвязанных полостей в мозге, содержащих спинномозговую жидкость) по сравнению с пациентами с биполярным расстройством. Это интересный результат, поскольку в последующих исследованиях оказалось, что у биполярных пациентов, переживших множество приступов, желудочки больше, чем у людей, переживших только один приступ, или у здоровой контрольной группы. Это означает, что увеличение желудочков может быть связано с заболеванием. Предположение, что униполярная мания не вызывает такие повреждения в мозге, хорошо соответствует более благоприятному прогнозу при этом состоянии.

Выделение униполярной мании как отдельного диагноза остается спорным вопросом. В качестве промежуточного этапа можно было бы официально признать заболевание подтипом биполярного расстройства. Этот шаг мог бы стимулировать исследования и повысить осведомленность врачей. Сущес задается вопросом: «Здесь есть загадка, которую мы не понимаем: почему у одних людей мания чередуется с депрессией, а у других есть только униполярная мания? Это заслуживает более интенсивного изучения, чем то, которое было до сих пор». Дальнейшее исследование может быть полезно и тем пациентам, которые не признают у себя других диагнозов. Линдси заявляет: «Самое важное, что может сделать для меня мой врач, — это сказать: извините, мы ошиблись, у вас не биполярное расстройство, а униполярное». ■

Перевод: М.С. Багоцкая

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Unipolar Mania: A Distinct Entity? Olcaу Yazici in *Journal of Affective Disorders*, Vols. 152–154, pages 52–56; January 2014.
- Madness May Enrich Your Life: A Self-Study of Unipolar Mood Elevation. David Y.F. Ho in *Psychosis*, Vol. 8, No. 2, pages 180–185; 2016.
- Differences between Unipolar Mania and Bipolar-I Disorder: Evidence from Nine Epidemiological Studies. Jules Angst et al. in *Bipolar Disorders*. Опубликовано онлайн в ноябре 2018 г.

ПОЧЕМУ МЫ ВЕРИМ В ТЕОРИИ



Illustration by Eddie Guy

ЗАГОВОРА



ПСИХОЛОГИЯ

Необоснованные предположения могут угрожать нашей безопасности и демократии. Оказалось, что некоторые эмоции провоцируют у людей мышление подобного типа

*Мелинда Уэннер
Мойер*

Стефан Левандовски (Stephan Lewandowsky), ученый-когнитивист, специализируется на отрицании. Около шести лет назад он начал исследовать, почему некоторые люди отказываются принять неопровержимые доказательства глобального потепления из-за деятельности человека. Когда Левандовски, работавший тогда в Университете Западной Австралии, погрузился в изучение отрицания климатических изменений, он обнаружил, что многие отрицающие это люди верили к тому же и в разные нелепые заговоры, вроде того, что посадка «Аполлона» на Луну была мистификацией, устроенной американским правительством. «Многие беседы, которые эти люди вели в интернете, были насквозь конспирологическими», — вспоминает ученый.

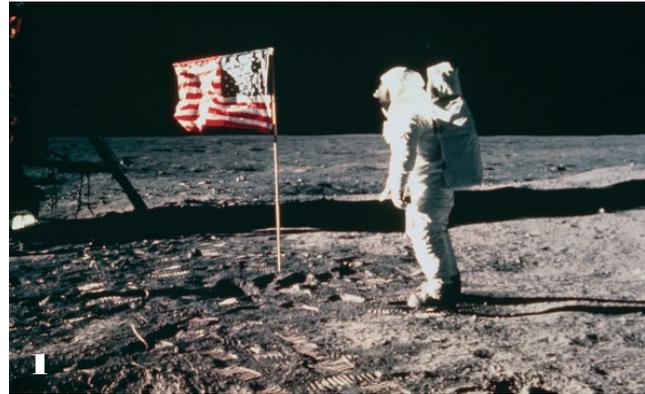


ОБ АВТОРЕ

Мелинда Уэннер Мойер (Melinda Wenner Moyer) — автор статей в *Scientific American*.

Левандовски опубликовал свои открытия в 2013 г. в журнале *Psychological Science*, вызвав необычное оживление в среде конспирологов. Оскорбленные его утверждениями, они в интернете обвинили ученого в нечестности и потребовали увольнения. Его не уволили, хотя с тех пор он перебрался в Англию в Бристольский университет. Однако когда Левандовски продирался сквозь череду их гневных сообщений, он обнаружил, что критики в ответ на обвинения в конспирологии распространяли новые теории заговора, но уже про самого Левандовски. Они обвинили его в подделке результатов опроса и проведении исследования без разрешения этической комиссии. Когда рухнул персональный сайт Левандовски, один блогер написал, что это сделано специально, чтобы скрыть сайт от критикующих. Все это было неправдой.

Поначалу ситуация казалась забавной, но вскоре злопыхатели начали угрожать убийством, а звонки и электронные письма в университет стали настолько агрессивными, что получавшие их сотрудники обратились к начальству за помощью. Левандовски изменил свое отношение к происходящему. «Я быстро понял, что в этих ребятах нет ничего смешного», — рассказывал он.



Тогда стали ясны опасные последствия конспирологического восприятия мира, то есть представлений, что люди или группы тайно вступают в сговор, чтобы добиться определенной цели. Стрелок, убивший 11 человек и ранивший еще шестерых в питтсбургской синагоге «Древо жизни» в октябре 2018 г., оправдывал нападение тем, что еврейский народ якобы тайно поддерживал нелегальных иммигрантов. В 2016 г. некто открыл стрельбу в пиццерии, будучи уверенным в том, что высокопоставленные члены демократической партии вовлечены в сексуальную эксплуатацию детей под прикрытием нескольких местных ресторанов в Вашингтоне. К счастью, никто не пострадал.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Лживые конспирологические теории могут подтолкнуть людей к насилию, как это случилось со стрелком в питтсбургской синагоге, и повлиять на политическую ситуацию.
- Эксперименты показывают, что к конспирологии особенно склонны тревожные люди и этот тип мышления запускается при потере контроля.
- Психологи считают, что ложные теории можно определить по таким признакам, как внутренние противоречия и шаткость доводов, на которых основаны суждения.

Конспирологическое мышление удивительно широко распространено, хотя, к счастью, заканчивается стрельбой не так часто. По данным государственного исследования, проведенного в 2017 г. Оксфордским и Ливерпульским университетами, более четверти жителей Америки считают, что «за многими вещами в мире» скрываются заговоры. Изучающий эту тему социальный психолог Вирен Свами (Viren Swami) из Университета Раскина рассказывает, что широкое распространение конспирологических слухов — явление не новое, но сейчас эти теории становятся более заметными. Например, когда в октябре 2018 г. более десятка бомб было отправлено известным демо-

способствует более конспирологическому типу мышления. По данным опросов, многие американцы сейчас испытывают именно эти эмоции, наряду с ощущением бесправия. В таких ситуациях теория заговора помогает восстановить внутренний комфорт, определив удобного козла отпущения и таким образом сделав мир более простым и контролируемым. «Люди могут решить, что если бы не эти плохие парни, то все было бы хорошо, — рассказывает Левандовски. — А если вы не верите в теорию заговора, вам придется признать, что ужасные вещи происходят случайно». В то же время отличить факты от вымысла бывает сложно, и некоторые казавшиеся дикими конспирологические



кратам, критикам Доналда Трампа и телеканалу CNN, некоторые консерваторы быстро предположили, что взрывчатка была так называемым ложным флагом — поддельной угрозой, организованной демократами, чтобы мобилизовать своих сторонников к промежуточным выборам в Конгресс США.

Одна из очевидных причин увеличения встречаемости мышления такого рода сейчас в том, что президент США сам озвучивает теории заговора. Доналд Трамп среди прочего предположил, что отец сенатора от Техаса Теда Круза способствовал убийству президента Джона Кеннеди, а демократы финансировали тот самый караван мигрантов из Гондураса в США, который так обеспокоил стрелка в синагоге Питтсбурга.

Конечно, тут играют роль и другие факторы. Как показывают новые исследования, события, происходящие в мире, подпитывают те самые эмоции, благодаря которым люди с большей готовностью верят в теории заговора. В экспериментах выяснилось, что чувство тревоги

идеи оказываются правдой. Ранее высмеивалось мнение, что Россия вмешивалась в президентские выборы в США в 2016 г., но сейчас это подтверждается множеством признаний вины, доказанных обвинений и заключений ЦРУ США. Так как же понять, во что верить? Над этой проблемой работали психологи, и они нашли стратегии, позволяющие людям отличать правдоподобные теории от явных вымыслов. По-видимому, такие стратегии с каждым днем становятся все нужнее.

Связь с тревогой

В мае 2018 г. Американская психиатрическая ассоциация опубликовала результаты национального опроса, согласно которому 39% американцев ощущают большую тревогу, чем год назад, в основном из-за здоровья, безопасности, финансов, политики и отношений. В отчете 2017 г. сообщается, что 63% американцев чрезвычайно обеспокоены будущим страны и 59% считают, что на их памяти это худшее положение дел в США. Такие ощущения испытывают люди из любой части

Конспирологи верят, что за многими ситуациями кроются заговоры. Некоторые считают, что посадка «Аполлона» на Луну была подделана (1). Другие думают, что Белый дом вынудил Энтони Кеннеди уйти в отставку из Верховного суда США (2). Кто-то верит, что наклейки с Трампом на фургоне рассылавшего бомбы были нужны, чтобы подставить республиканцев (3). Стрелок, убивший 11 человек в синагоге в 2018 г., утверждал, что евреи разрушают Америку (4).

политического спектра. Опрос, проведенный Исследовательским центром Пью в 2018 г., показал, что и среди демократов, и среди республиканцев большинство считают, что в последние годы в политике их сторона проигрывает в значимых для них вопросах. Такие экзистенциальные кризисы могут способствовать конспирологическому мышлению. В работе, проведенной в 2015 г. в Нидерландах, исследователи разделили студентов колледжа на три группы. Людей из первой группы заставили ощутить собственное бессилие. Ученые попросили их написать о том времени в жизни, когда они чувствовали, что не могут контролировать ситуацию, в которой оказались. Тем, кто был во второй группе, досталось противоположное состояние. Их попросили написать о том времени, когда они чувствовали, что полностью контролируют ситуацию. Участников из третьей группы попросили написать на нейтральную тему: что они ели вчера на ужин. Затем исследователи спросили участников из всех трех групп, что они думают о строительстве новой линии метро в Амстердаме, где постоянно возникают осложнения. Студенты, подготовленные к тому, чтобы ощущать контроль над ситуацией, в отличие от двух других групп были менее склонны поддерживать теории заговора про линию метро, о том, что городские власти воруют из бюджета и преднамеренно подвергают жителей опасности. Аналогичные эффекты были обнаружены и в других исследованиях. Например, в 2016 г. Свами с коллегами сообщили, что люди, испытывающие стресс, с большей вероятностью поверят в теории заговора, и в исследовании 2017 г. было показано, что повышение тревоги у людей делает их более склонными к конспирологическому мышлению.

Ощущение отчужденности и ненужности, по-видимому, тоже повышает привлекательность конспирологического мышления. В 2017 г. психологи из Принстонского университета провели эксперимент с тройками людей. Исследователи попросили всех участников написать два абзаца о себе, а затем сказали им, что эти описания будут переданы двум другим участникам из их группы, которые должны будут использовать информацию, чтобы решить, готовы ли они в дальнейшем работать с этим человеком. Сказав некоторым участникам, что они

были приняты группой, а другим, что они были отвергнуты, исследователи оценили представления участников о различных ситуациях, связанных с заговорами. «Отвергнутые» участники, ощущавшие свою отчужденность, чаще решали, что в определенной ситуации присутствует организованный заговор.

Не только собственные проблемы побуждают людей строить конспирологические предположения. Точно так же влияют и коллективные социальные неудачи. В работе, проведенной в 2018 г., исследователи из Миннесотского и Лихайского университетов опросили более 3 тыс. американцев. Обнаружилось, что те участники, которые считали, что американские ценности разрушаются, с большей готовностью соглашались с конспирологическими утверждениями, такими как «за многими крупными событиями кроется деятельность небольшой группы влиятельных людей». Политолог из Университета Майами Джозеф Ушински (Joseph Uscinski) вместе с коллегами показал, что люди, которым не нравится находящаяся у власти политическая партия, мыслят более конспирологически, чем те, кто поддерживает правящую партию. В последнее время в США ряд бездоказательных утверждений исходят от либералов, поскольку к власти пришли консерваторы. Среди прочего это предположения, что Белый дом вынудил Энтони Кеннеди уйти в отставку из Верховного суда США и что президент России Владимир Путин шантажирует Доналда Трампа с помощью видео, где Трамп наблюдает, как проститутки мочатся на постель в московском отеле.

Когда чувство личного отчуждения или тревоги сочетается с ощущением, что общество в опасности, это действует как двойной удар. В исследовании, проведенном в 2009 г., вскоре после начала мирового экономического кризиса, Дэниел Салливан (Daniel Sullivan), психолог, работающий сейчас в Аризонском университете, вместе с коллегами говорил одной группе людей, что они почти не могут контролировать многие аспекты собственной жизни, поскольку существуют стихийные бедствия и другие катастрофы, а другой группе — что все под контролем. Затем участников просили прочитать тексты, в которых было написано, что правительство либо хорошо справляется с экономическим кризисом,

либо плохо. Те, кому напоминали о неконтролируемых жизненных ситуациях и сообщали, что правительство плохо работает, были более склонны к конспирологическому мышлению, поскольку считали, что негативные события их жизни — не случайность, а происки врагов.

Несмотря на то что люди ищут в теориях заговора утешение, они его редко находят. «Это привлекательно, но совсем не обязательно приносит удовлетворение», — говорит Дэниел Джолли (Daniel Jolley), психолог из Стаффордширского университета. Например, из-за конспирологического мышления люди могут вести себя так, что ощущение бессилия увеличивается и они начинают чувствовать себя еще хуже. В исследовании 2014 г., где Джолли был соавтором, обнаружилось, что люди выражали меньшую готовность голосовать, если перед этим им рассказывали конспирологические теории об изменениях климата, например что это будто бы просто способ получения финансирования для ученых. А в исследовании 2017 г. показано, что вера в заговоры, связанные с работой, например что менеджеры принимают решения в пользу своих собственных интересов, заставляет людей чувствовать меньшую преданность своей работе. «Это становится снежным комом, порочным, неприятным циклом бездействия и негативного поведения», — говорит Карен Дуглас (Karen Douglas), психолог из Кентского университета и соавтор статьи о теориях заговора, связанных с работой.

Негативные убеждения и отчуждение у кого-то могут спровоцировать опасное поведение, как было с питтсбургским стрелком и атакой на пиццерию. Но теории могут нанести вред и без оружия. Например, люди, которые верят в теории заговора о вакцинации, реже прививают своих детей, и таким образом создаются очаги инфекционных заболеваний, из-за которых опасность подвергается все местное население.

Отличить факт от вымысла

Конспирологическое мышление можно до некоторой степени притушить. Один из старых вопросов — стоит ли использовать логику и доказательства для противодействия теории заговора. Ранее некоторые исследователи указывали на «эффект обратного действия» — что опровержение ложной информации

может спровоцировать людей «упереться рогом». «Если вы думаете, что существуют могущественные силы, пытающиеся устроить заговор и скрыть это, то когда вам предъявляют факты, которые вы считаете прикрытием, это только доказывает вам вашу правоту», — говорит Ушински.

Однако в более свежих исследованиях показано, что на самом деле такое встречается достаточно редко. В работе 2016 г. обнаружилось, что когда исследователи опровергли теорию заговора, указав на логические несоответствия, она стала для людей менее привлекательной. А в работе, опубликованной в 2018 г. онлайн в журнале *Political Behavior*, исследователи набрали более 10 тыс. человек и предъявили им поправки к различным утверждениям политических деятелей. Авторы пришли к выводу, что «свидетельства в пользу эффекта обратного действия совсем не столь убедительны, как считали предыдущие исследователи». В недавнем обзоре ученые, первыми описавшие эффект обратного действия, сообщают, что он чаще всего возникает, если оспорить и другие представления человека, определяющие его мировоззрение и самоощущение. Поэтому может быть полезным искать способы опровергнуть теорию заговора, не задевая личность человека.

Поощрение аналитического мышления тоже помогает. Для исследования 2014 г., опубликованного в *Cognition*, Свами с коллегами набрали 112 человек. Сначала все должны были заполнить анкету, чтобы можно было оценить, насколько сильно участники верят в различные теории заговора. Через несколько недель участники пришли снова, и исследователи разделили их на две группы. Одной группе дали предложения, в которых надо было расшифровать такие слова, как «анализировать» и «рациональный», что настраивало участников мыслить более рационально. Вторая группа выполняла нейтральную задачу. Затем исследователи повторно проверили обе группы на веру в теории заговора. Хотя в начале эксперимента участники обеих групп не отличались друг от друга по склонности к конспирологическому мышлению, те, кого затем побуждали к аналитическому мышлению, оказались теперь менее склонными к конспирологии. Таким образом, дав людям «способы и навыки для анализа данных и объективного

критического взгляда на факты», мы можем подавить конспирологическое мышление, говорит Свами.

Аналитическое мышление помогает также отличить неправдоподобные теории от тех, которые звучат дико, но подкрепляются доказательствами. Карен Мерфи (Karen Murphy), педагог-психолог из Университета штата Пенсильвания, предлагает людям, которые хотят улучшить свои навыки аналитического мышления, при интерпретации конспирологических утверждений задавать три вопроса. Первый: чем докажете? Второй: каков источник этих доказательств? Третий: почему вы считаете, что ваши доказательства связаны с исходным утверждением? Источники доказательств должны быть надежными, авторитетными и актуальными. Мерфи поясняет на примере: «Не следует прислушиваться к мнению своей мамы, когда она говорит, что желтизна под ногтями — плохой признак». Информацию такого рода надо получать от специалиста в этой области, например врача.

Кроме того, ошибочные теории заговора имеют ряд отличительных признаков, рассказывает Левандовски. Три из них особенно заметны.

Первый — наличие противоречий. Например, некоторые противники представлений об изменении климата утверждают, что среди ученых нет единого мнения по этому поводу, и в то же время считают себя героями, выступающими против единого мнения. Оба утверждения не могут быть верны одновременно.

Второй показательный признак — ненадежность предположений, из которых делается вывод. Так, Трамп утверждал, что во время президентских выборов 2016 г. проголосовали миллионы нелегальных иммигрантов и поэтому он не набрал большинства голосов избирателей. Помимо отсутствия доказательств существования такого голосования, сомнительно также предположение, что если бы эти люди голосовали, то они выбрали бы его демократического противника. По данным прошлых опросов нелегальных испаноязычных иммигрантов, многие из них проголосовали бы за кандидата от республиканцев, а не от демократов.

Третий признак того, что утверждение представляет собой выдуманную теорию, а не настоящий заговор: аргументы против такой теории интерпретируются

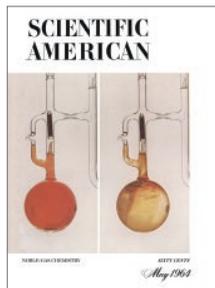
ее сторонниками, как доводы в ее пользу. Например, когда на обнаруженном во Флориде фургоне Сезара Сайока, подозреваемого в рассылке бомб, оказались наклейки с Трампом, некоторые сочли это доказательством, что за рассылкой бомб действительно стоит демократическая партия. «Если кто-то считает, что так должен выглядеть фургон настоящего консерватора, то он не видит очевидного. Это явно ложный флаг, а Сезар Сайок — просто козел отпущения», — написал один пользователь в *Twitter*.

Теории заговора — это способ реакции людей на смутные времена. «Мы все просто пытаемся понять мир и то, что в нем происходит», — говорит Роб Бразертон (Rob Brotherton), психолог из Барнард-колледжа и автор книги «Недоверчивые умы: чем нас привлекают теории заговоров» (*Suspicious Minds: Why We Believe in Conspiracy Theories*). Но от такого мышления может быть реальный вред, особенно если верящие в заговор для поддержки своих взглядов прибегают к насилию. Однако высматривая подозрительные признаки и задавая вдумчивые вопросы об историях, с которыми мы сталкиваемся, вполне можно отличить правду от лжи. Может быть, это не всегда легко, но очень важно для всех нас. ■

Перевод: М.С. Багоцкая

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- NASA Faked the Moon Landing — Therefore, (Climate) Science Is a Hoax: An Anatomy of the Motivated Rejection of Science. Stephan Lewandowsky et al. in *Psychological Science*, Vol. 24, No. 5, pages 622–633; May 2013.
- The Influence of Control on Belief in Conspiracy Theories: Conceptual and Applied Extensions. Jan-Willem van Prooijen and Michele Acker in *Applied Cognitive Psychology*, Vol. 29, No. 5, pages 753–761; September/October 2015.
- Putting the Stress on Conspiracy Theories: Examining Associations between Psychological Stress, Anxiety, and Belief in Conspiracy Theories. Viren Swami et al. in *Personality and Individual Differences*, Vol. 99, pages 72–76; September 2016.
- Suspicion in the Workplace: Organizational Conspiracy Theories and Work-Related Outcomes. Karen M. Douglas and Ana C. Leite in *British Journal of Psychology*, Vol. 108, No. 3; pages 486–506; August 2017.
- What a Hoax. Sander van der Linden; *Scientific American Mind*, September/October 2013.



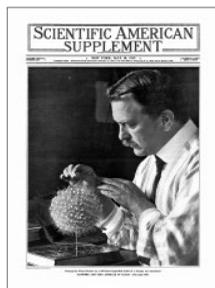
МАЙ 1969

Эпидемия отравлений свинцом.

Хотя в США свинцовые пигменты в красках для внутренних работ не используются уже около 20 лет, многослойные покрытия на основе свинца все еще остались в старых домах и квартирах. И сегодня отравление свинцом, когда-то

профессиональный бич художников, — в основном болезнь малышей от года до пяти, проживающих в трущобах и грызущих краску, которая отваливается от обветшалых стен и от растрескавшихся подоконников. Участники конференции в Рокфеллеровском университете в марте этого года указывают, что эту «тихую эпидемию» можно остановить с помощью экстренных медицинских, социальных и юридических мер.

Серебро военного времени. Более 2,1 тыс. т серебра стоимостью \$124 млн были демонтированы на заводе по электромагнитному разделению изотопов в Ок-Ридже, штат Теннесси, и возвращены в Министерство финансов США. Это серебро составляло часть из 15 тыс. т, переданных в 1942 г. во временное пользование для реализации Манхэттенского проекта, чтобы создать обмотки огромных магнитов для электромагнитных сепараторов, использовавшихся для отделения делящегося изотопа урана-235 от нерасщепляющегося урана-238. Процесс позволил получить уран-235 высокой степени очистки для атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму. Серебро, стоившее тогда более \$400 млн, было использовано вместо меди, которой в то время не хватало.



МАЙ 1919

Пол и интерсекс.

Скрупулезное изучение проявлений половых различий у различных растений и животных, проведенное доктором Артуром Бантой (Arthur Mangum Banta) при содействии Института Карнеги, привело его к ряду интересных идей: «Похоже,

чрезвычайно важно пересмотреть наши представления о неизменяемости пола, принимая во внимание, что относительность пола была с такой очевидностью показана у гибридов голубей, мотыльков и различных видов клопов (ветвистоусых рачков)». Биолог ссылается на такие проявления, как «кукарекающая курица» и «петух-наседка», мужеподобная женщина и женственный

мужчина, как на наглядные примеры гермафродитов, опровергающие привычное понимание «мужского» и «женского» как абсолютных, противоположных и взаимоисключающих явлений.

Худший аэроплан. Со смертью авиатора Джолли (Allington Joyce Jolly) сегодня на счету аэроплана Уильяма Кристмаса «Пуля» (Christmas Bullet), или «биплана без вертикальных стоек», уже две жертвы. На следующий день после катастрофы автор этих строк побывал на одном из летных полей на Лонг-Айленде, где воздухоплатателя хорошо знали и любили. Страсти среди летчиков и механиков, подвергших критике конструкцию аэроплана Кристмаса, кипели. Они указывали на предыдущее крушение «Пули». Джолли, по-видимому, постигла такая же судьба: высоко в воздухе одно из крыльев биплана отломилось, и он с силой врезался в землю. Все сошлись во мнении, что пора заканчивать эксперименты с ненадежными конструкциями.



МАЙ 1869

Приспособление для ходьбы.

Представленное устройство имеет целью помочь малышам научиться ходить, чтобы защитить их от опасностей и ушибов и освободить мать или прислугу от необходимости постоянного надзора. Вокруг туловища малыша крепится снабженное

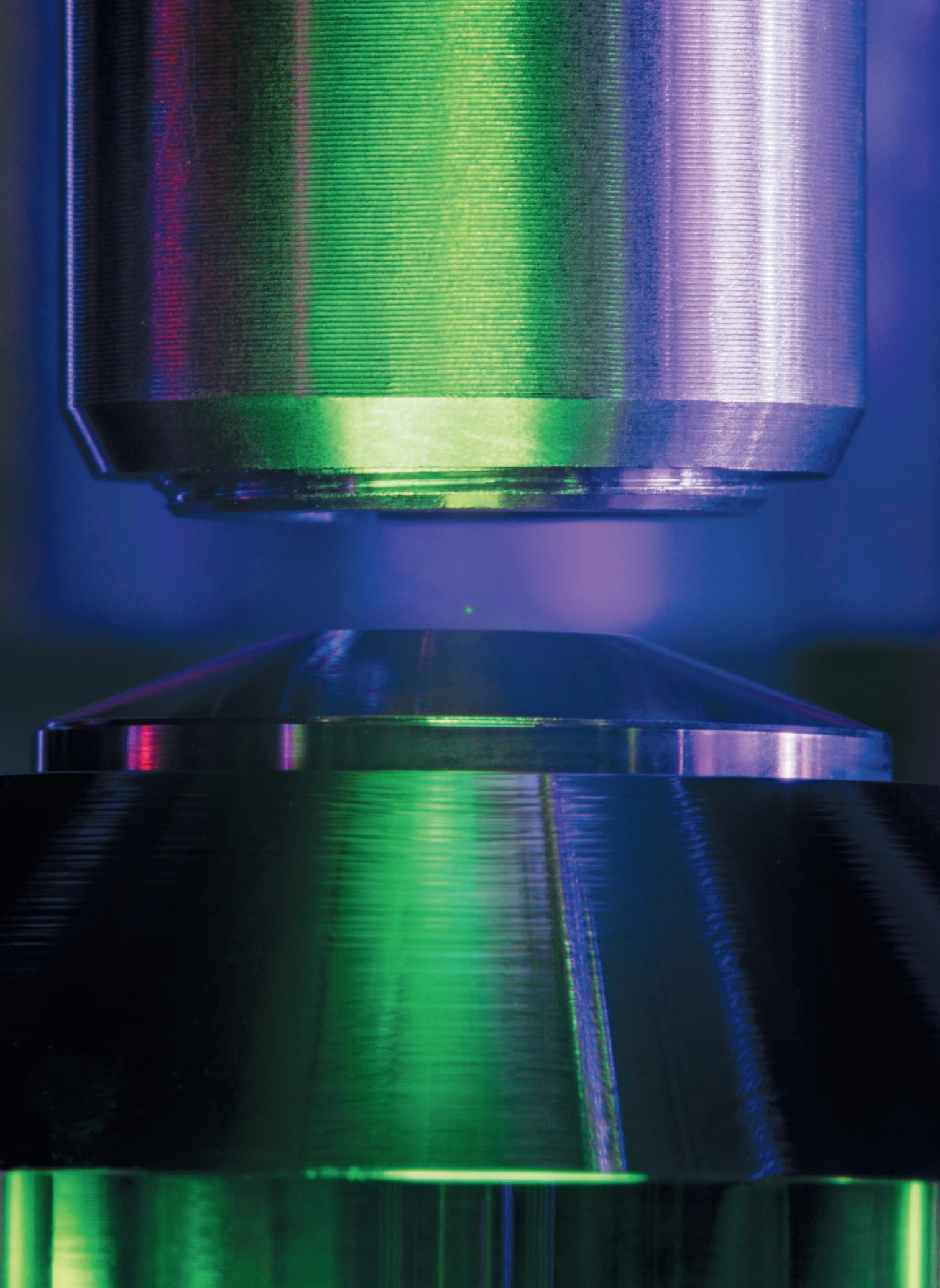
подушками кольцо, надежно крепяемое шарнирной петлей. К основанию крепятся легко вращающиеся ролики, которые позволяют приспособлению поворачиваться и двигаться по полу в любом направлении. Запатентовано при содействии Патентного агентства *Scientific American*.

Бизоны и столбы. В столбах наземных телеграфных линий буйволы нашли источник наслаждения на просторах лишенных деревьев прерий — нечто новое, обо что можно потереться. Но эти почесывания слишком дорого обходятся телеграфной компании, так как ежедневно бизоны обрывают несколько миль проводов.

Кому-то пришла в голову блестящая идея скупить в Сент-Луисе и Чикаго все имеющиеся в продаже шила и утыкать ими столбы с целью отогнать животных. Бóльшей ошибки нельзя было допустить. Буйволы были в восторге. Теперь они шли за ощущением, которое проймают их толстые шкуры от рогов до хвоста, и чесались до тех пор, пока не обломится шило или не повалится столб.



Ходунки для малышей, как было доказано позже, замедляют развитие навыков ходьбы



КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ В ЛАБОРАТОРИИ

В попытках объединить теории гравитации и квантовой механики физики долгое время полагали, что практические эксперименты недоступны, однако новые предложения дают возможность проверить квантовую природу гравитации буквально на лабораторном столе

Тим Фолджер

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Для объединения знаменитых своим отказом сотрудничать теории квантовой механики и общей теории относительности ученым, вероятно, придется проникнуть в невообразимо малые области «планковского масштаба». Практические эксперименты по исследованию такого масштаба давно считались невозможными, но несколько новых предложений могут изменить эту точку зрения.
- Физики надеются, что, проведя чрезвычайно точные измерения гравитации на малых масштабах — эксперименты, которые поместятся на столе в лаборатории, — они смогут обнаружить эффекты пересечения гравитации и квантовой теории.
- Эксперименты направлены на то, чтобы показать, становится ли гравитация квантованной — то есть делимой на дискретные биты — в чрезвычайно крошечных масштабах.

ОБ АВТОРЕ

Тим Фолджер (Tim Folger) — независимый журналист, пишет для *National Geographic*, *Discover* и других американских национальных изданий. Редактор серии «Заметки о достижениях американской науки и о природе» (*The Best American Science and Nature Writing*), ежегодной антологии издательства *Houghton Mifflin Harcourt*.



В

1797 г. один из ведущих ученых Великобритании Генри Кавендиш построил устройство для взвешивания мира. В те времена масса Земли была неизвестна, как и ее состав. Был ли он в основном сплошным камнем? Менялся ли он в зависимости от глубины? Астроном Эдмонд Галлей предполагал даже, что Земля может быть полый. Исаак Ньютон сравнивал массу Земли с массой других тел в Солнечной системе и знал, например, что Земля массивнее Луны. Он даже предложил способ определения абсолютной массы Земли: измерение гравитационного притяжения между двумя маленькими сферическими массами с большой точностью и с последующей экстраполяцией из полученного результата величины собственной массы Земли. Однако Ньютон быстро отбросил свою идею — он решил, что притяжение между сферами окажется слишком малым, чтобы быть обнаруженным, даже обладай эти сферы непрактично большими массами. «Нет, недостаточно и целых гор, чтобы произвести какой-то разумный эффект», — писал он в своем шедевре «Начала», в котором излагались предложенные им законы движения и тяготения.

Более века спустя одним августовским днем Кавендиш доказал, что Ньютон ошибался. Устройство, сооруженное им в сарае в его поместье на юго-западе Лондона, состояло из двух шестифунтовых свинцовых шариков, прикрепленных к противоположным концам шестифутового деревянного стержня, который свисал с проволоки, прикрепленной к потолочной балке. Две более тяжелые свинцовые сферы, каждая весом около 350 фунтов, подвешивались отдельно примерно в девяти дюймах от более легких шаров. Кавендиш ожидал, что гравитационное притяжение тяжелых сфер к меньшим заставит деревянный стержень слегка вращаться, и оказался прав: стержень смещался на величину, чуть большую десятой части дюйма.

Приведенный эксперимент позволил Кавендишу непосредственно измерить гравитационную силу, оказываемую каждой из больших сфер на меньшие. Поскольку

ученый уже знал, что Земля оказывает гравитационную силу в 1,6 фунта на каждую из малых сфер (в английской системе единиц фунт по определению представляет собой меру силы), он смог установить простое соотношение гравитационной силы между малой сферой и большой сферой по сравнению с гравитационной силой между малой сферой и Землей. Поскольку гравитационная сила прямо пропорциональна измеряемым массам, он мог бы использовать это соотношение для вычисления неизвестной массы Земли. В течение девяти месяцев он повторил эксперимент 17 раз и обнаружил, что Земля весит 13 миллионов миллиардов миллиардов фунтов, — результат, по сути, идентичный лучшим современным оценкам.

По словам Маркуса Аспельмейера (Markus Aspelmeyer), физика из Венского университета, который рассказывал об эксперименте Кавендиша во время нашего разговора по скайпу, «это просто невероятная



Сверхпроводящий контур (1) помогает эксперименту по левитации. Исследователи пытаются измерить гравитационные поля золотых сфер миллиметровой толщины (2), чтобы наблюдать гравитацию ближе к квантовой области.

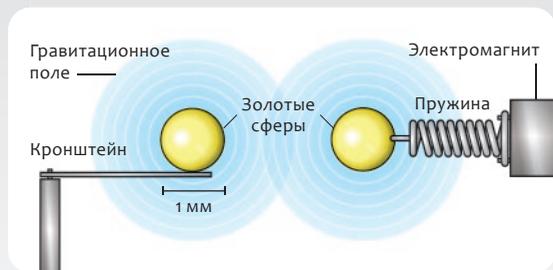
история — это был первый прецизионный настольный эксперимент [с гравитацией]». Подвиг Кавендиша 220-летней давности на самом деле, конечно, не проводился буквально на столешнице. Этот эксперимент стал источником вдохновения для Аспельмейера. Как ранее у Кавендиша, у него имеется план амбициозного, кажущегося невозможным эксперимента, который в состоянии изменить наше понимание гравитации. Ученый собирается использовать мелкогобаритную установку — буквально на столе в своей лаборатории, — чтобы найти доказательства того, что гравитация может быть квантовым явлением.

Из четырех фундаментальных сил во Вселенной гравитация единственная, которая не может быть описана законами квантовой механики — теории, которая применима ко всем другим силам и частицам, известным физике. Электромагнетизм, «сильная» ядерная сила, связывающая атомные ядра, и «слабая» ядерная сила, вызывающая радиоактивный распад, — все они квантовые по отношению к ядру, но гравитация остается единственным таинственным исключением.

Это исключение раздражало физиков со времен расцвета теории Альберта Эйнштейна. Эйнштейну так и не удалось объединить собственную теорию гравитации — общую теорию относительности — с квантовой механикой. Большинство физиков, которые сейчас работают над этой проблемой, считают, что объединение происходит, когда при наблюдении далекой Вселенной мы приближаемся к ранним эпохам ее развития, к тому, что называется планковской шкалой (названной в честь Макса Планка, одного из основателей квантовой теории). Расстояния на планковских масштабах настолько крошечны — в 100×10^{24} раз меньше атома водорода, — что само пространство-время, как полагают, начинает обладать квантовыми характеристиками. Квантовое пространство-время уже больше не гладкий континуум, описываемый общей теорией относительности; оно стало бы крупнозернистым, как цифровая фотография, которая становится пиксельной при увеличении. Эта зернистость — отличительная черта квантовой теории, которая ограничивает энергию, импульс и другие

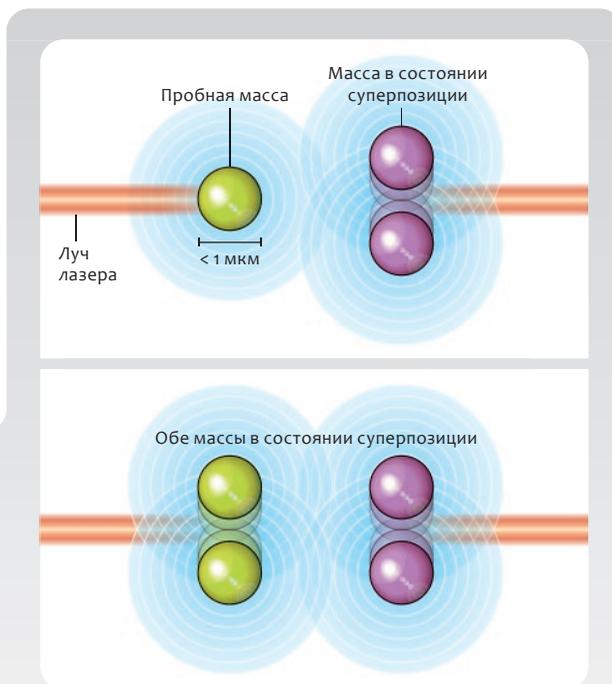
Эксперименты по квантовой гравитации

Чтобы понять, вписывается ли гравитация в квантовую теорию, физики разрабатывают эксперименты по измерению гравитационных полей с предельной точностью для поиска признаков квантового поведения. Такое поведение может включать в себя «суперпозицию» — способность квантовых частиц занимать два места одновременно — и «запутанность» — своего рода связь между квантовыми объектами, где их судьбы переплетаются. Если исследователи найдут доказательства того, что гравитационные поля обладают свойствами суперпозиции или запутанности, то они поймут, что гравитация обладает квантовыми свойствами.



Предварительный эксперимент № 1

Один эксперимент, предложенный физиком Маркусом Аспельмейером, в конечном счете предполагает помещение массы в состояние суперпозиции, то есть в двух местах одновременно, с дальнейшей целью увидеть, расщепляется ли гравитационное поле этой массы на два или нет. Предварительная версия опыта позволит разработать технологию обнаружения гравитационных полей объектов более мелких, чем подвергнутые аналогичным измерениям когда-либо ранее, — в данном случае двух крошечных золотых сфер. Электромагнит, прикрепленный к пружине, заставит одну сферу вибрировать, а другая, на конце кронштейна, должна будет колебаться в ответ на изменение гравитационного притяжения.



Окончательный эксперимент № 1

В итоге научная команда будет стремиться поставить одну из этих сфер в состояние суперпозиции. Если гравитационное поле сферы тоже переходит в состояние суперпозиции и будет существовать в двух местах, то вторая сфера должна почувствовать притяжение обоих полей и «запутаться», также входя в состояние суперпозиции.

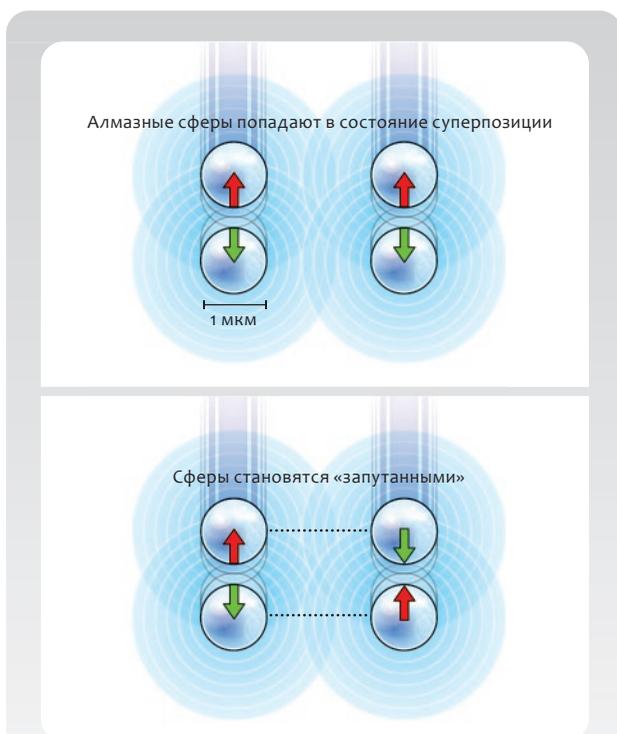
свойства частиц дискретными битами или квантами. Но что же такое квант пространства-времени? Как можно измерить время или расстояние, если сами пространство и время раздроблены, как сломанные линейки?

По словам Майлза Бленкоу (Miles Blencowe), физика-теоретика из Дартмутского колледжа, «все наши теории физики явно или неявно требуют существования стержней и часов: что-то произошло [здесь] в это время, а затем сделало это [там] в более позднее время; с чего же вы начнете, если у вас не окажется ни параметра времени, ни параметра расстояния?» Лайош Диоши (Lajos Diósi), физик-теоретик из Научно-исследовательского центра физики им. Вигнера Венгерской академии наук, подытоживает проблему следующим образом: «Мы не знаем, что там будет, но мы точно знаем, что на планковской

шкале обнаружится совершеннейшее взбалтывание непрерывного пространства-времени».

К сожалению физиков, нет возможности наблюдать явления на планковских масштабах — и, таким образом, нельзя проверить предсказания разных теорий квантовой гравитации, чтобы увидеть, какая же из них может оказаться правильной. «Дело не в том, что у нас нет теорий квантовой гравитации, — комментирует Карло Ровелли (Carlo Rovelli), физик-теоретик из Университета Экс-Марсель во Франции, — мы создаем их. Проблема в том, что у нас несколько таких теорий».

В физике чем выше энергетический масштаб вашего эксперимента, тем меньше масштаб расстояний, которые вы можете исследовать. Для прямого зондирования планковской шкалы потребовалась бы машина на 15 порядков мощнее, чем Большой



Эксперимент № 2

Концепция второго эксперимента, предложенная двумя группами (Сугато Бозе и его коллегами и, независимо от них, Кьярой Марлетто и Влатко Вedralем), заключается в рассмотрении падения бок о бок двух алмазных сфер в течение нескольких секунд. Если сферы находятся всего в 100 мкм друг от друга, то близость их гравитационных полей должна привести к «запутыванию» сфер. И коль скоро это произойдет, экспериментаторы обнаружат корреляцию между направлениями их спинов после падения. Если же частицы не запутываются — предположительно потому, что гравитация не испытывает указанного квантового явления, — то ориентация спинов должна быть случайной.

адронный коллайдер, крупнейший из когда-либо построенных ускорителей частиц окружностью 27 км. По словам физиков, такой ускоритель должен быть размером примерно с нашу Галактику. Ускорители, подобные БАК, сталкивают частицы почти со скоростью света, и физики надеются, что из обломков появится что-то новое.

Основной подход непринципиально отличается от взрыва сейфа с целью выяснить, что находится внутри. Сторонники небольших лабораторных экспериментов стремятся заменить грубую силу на изящество взломщика сейфа, который прислушивается к легчайшему щелчку запирающего устройства. По словам Эрика Эделбергера (Eric Adelberger), физика из Вашингтонского университета, «вы обмениваете высокую энергию на высокую точность — вот как я смотрю на это». Ученый полагает, что «есть граница энергии

и есть граница точности; если вы можете измерить что-то очень, очень хорошо, то вы можете проверить физику, которая происходит в очень высоком энергетическом масштабе». Сейчас по крайней мере три группы, включая группу Аспельмейера, разрабатывают эксперименты именно для этого. Ученые оптимистично настроены на достижение проектами уровня точности, необходимого для исследования области, где гравитация переходит в квантовую теорию.

Мысленный эксперимент

Для понимания того, почему точность позволяет физикам косвенно получать доступ к более высоким энергиям, а значит и к меньшим масштабам, рассмотрим исторический аналог: броуновское движение. В статье, опубликованной в 1905 г., Эйнштейн показал, что загадочные случайные движения зерен пылицы в банке с водой можно объяснить столкновениями с молекулами воды, хотя сами молекулы на много порядков меньше и их нельзя наблюдать непосредственно. Аспельмейер и другие физики делают ставку на то, что ненаблюдаемо малые вещи, происходящие в планковской области, могут аналогичным образом влиять на явления, доступные для небольших лабораторных экспериментов.

И хотя ускорители частиц не могут быть увеличены на порядки — мы вряд ли увидим ускорители с тысячекилометровыми окружностями, — точность настольных экспериментов вполне может улучшиться на несколько порядков в ближайшие десятилетия.

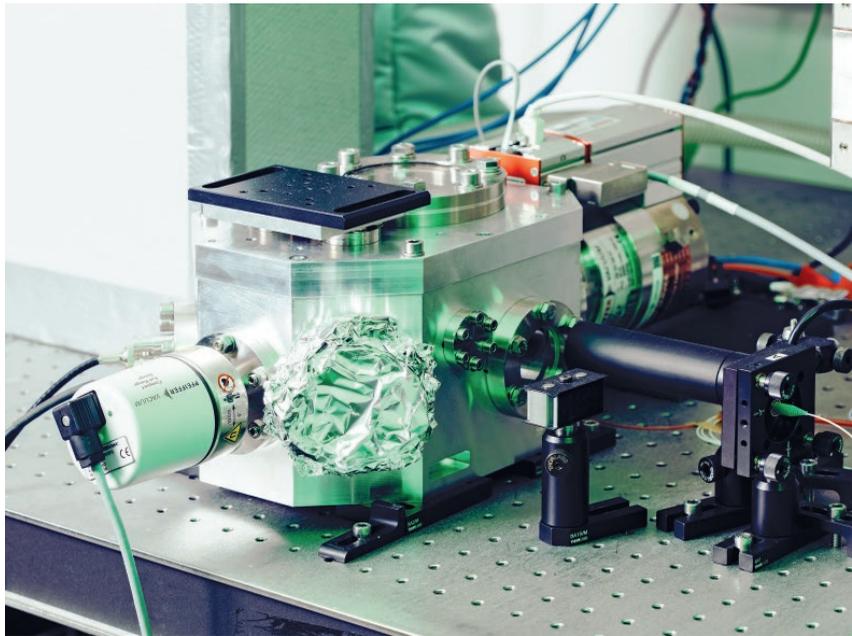
Такой выигрыш может позволить Аспельмейеру проверить ключевое предположение, разделяемое всеми теориями квантовой гравитации: что сама гравитация должна проявлять некоторые очень странные квантовые свойства. По словам ученого, «если это действительно так, то должны быть некоторые последствия для явлений в энергетическом масштабе, который намного меньше [чем высокие энергии, соответствующие шкале Планка]». Другими словами, примерно в том энергетическом масштабе, в котором мы живем. По мнению Аспельмейера, вопрос

состоит в том, можем ли мы придумать эксперименты, проверяющие эти последствия.

Аспельмейер имеет в виду эксперимент по измерению гравитационного притяжения между двумя сферическими массами. Однако в отличие от Кавендиша Аспельмейер не будет взвешивать Землю, а его миллиграммовые массы на порядки меньше, чем свинцовые сферы Кавендиша. Он хочет проверить, влияет ли гравитация на квантовые свойства малых масс. В частности, Аспельмейер намеревается рассмотреть, какого рода гравитационные эффекты могут быть порождены объектом, помещенным в состояние, подобное состоянию кота Шредингера, присутствующего и «здесь», и «там» одновременно.

В квантовом мире частицы обладают сверхъестественной способностью находиться в двух местах одновременно — свойство суперпозиции, как его называют физики. Ученые наблюдали квантовые суперпозиции много раз в лабораториях, но это очень «деликатные» состояния. Дело в том, что взаимодействие с любыми соседними частицами быстро приводит к тому, что объекты в суперпозиции «коллапсируют» в одно положение. (*Коллапсирует волновая функция квантовых объектов. — Примеч. пер.*) Но пока состояние суперпозиции продолжается, Аспельмейер задается вопросом, какими свойствами обладают эти частицы. Например, создают ли они свои собственные крошечные гравитационные поля? «Представьте, что вы помещаете объект в состояние суперпозиции, а теперь задаете вопрос: как он поведет себя с точки зрения гравитационных взаимодействий? Это вопрос, на который мы и хотим ответить».

Эксперимент, который Аспельмейер надеется провести, впервые был предложен как так называемый мысленный эксперимент легендарным физиком Ричардом Фейнманом (Richard Feynman) на конференции в 1957 г. Фейнман утверждал, что если гравитация — действительно



Вакуумные камеры изолируют небольшие массы от внешних воздействий для точнейшего измерения их гравитационных полей

квантовое явление, то суперпозиция частицы в двух местах одновременно создаст два отдельных гравитационных поля. Согласно общей теории относительности, гравитационные поля — это искажения пространства-времени. Таким образом, в случае небольшой массы в квантовой суперпозиции два различных пространства-времени будут сосуществовать бок о бок, почти как две отдельные мини-вселенные, — это состояние, которого не должно существовать в теории Эйнштейна.

Если бы возникла такая пространственно-временная суперпозиция, то как бы с ней взаимодействовал другой объект — пробная масса? Указывает ли движение испытываемой массы на то, что она ощущает притяжение двух различных гравитационных полей? Или, как считают некоторые физики, взаимодействие повлечет за собой коллапс волновой функции и исчезновение суперпозиции, что приведет к нормальной гравитационной динамике? Если бы суперпозиция сохранялась и если бы пробная масса действительно взаимодействовала с гравитационными полями суперпозиции, это было бы убедительным доказательством того, что пробная масса и суперпозиция стали «запутанными» — это характерный признак квантовой механики, где свойства двух отдельных частиц становятся неразрывно связанными. Фейнман утверждал, что, поскольку



только квантовые явления могут «запутываться», то эксперимент покажет, что гравитация, как и все другие известные силы во Вселенной, — фундаментально квантовая.

Такой результат сам по себе не подтвердил бы никакой конкретной теории квантовой гравитации, но он послужил бы косвенным доказательством того, что гравитация квантована на уровне планковского масштаба. В более широком смысле эксперимент мог бы стать убедительным доказательством того, что законы квантовой механики действуют на всех уровнях, а не только в области фотонов, атомов и других фундаментальных частиц.

Некоторые физики цеплялись за идею, что квантовая механика может перестать работать, когда дело доходит до описания макромира. Так, Роджер Пенроуз (Roger Penrose), физик из Оксфордского университета, и Диоши предположили, что гравитация приводит к коллапсу суперпозиций выше определенного размера, эффективно отделяя квантовый мир от так называемого классического.

Как говорит Кьяра Марлетто (Chiara Marletto), физик-теоретик из Оксфорда, «одна из областей, где квантовая теория должна потерпеть неудачу, — это когда дело доходит до описания гравитации». По ее словам, «многие выдающиеся ученые утверждали, что гравитация будет именно тем пунктом, где нарушится квантовая теория; так, вместо квантованной [теории] гравитации мы должны фактически сделать квантовую теорию классической, чтобы она описывала гравитацию». При таком подходе квантовую теорию, возможно, придется модифицировать, чтобы привести ее в соответствие с общей теорией относительности, а не пытаться вписать гравитацию в квантовую теорию в ее нынешнем виде.

Мысль превращается в реальность

Для того чтобы решить рассматриваемый вопрос, нужны были технология и опыт, которых не существовало, когда Фейнман придумал свою идею. Проект остается сложным даже сейчас. Вот уже несколько лет лаборатория Аспельмейера пытается измерить гравитационные поля все меньших масс. Это сложное предприятие: огромная гравитация Земли буквально топчет гравитационные поля даже относительно больших объектов. Наименьшая масса, для которой гравитационное поле было измерено до сих пор, — это

700-миллиграммовая вольфрамовая сфера. Речь идет о массе скрепки или изюминки — гигантском объекте по сравнению с квантовыми частицами.

Чтобы реализовать мысленный эксперимент Фейнмана, Аспельмейеру и его коллегам придется поработать с объектами гораздо меньшими, чем скрепки. В настоящее время они разрабатывают экспериментальный образец для обнаружения гравитационных полей золотых сфер миллиметровой толщины (золото было выбрано за его плотность и чистоту) весом всего в несколько десятков миллиграммов. По словам Аспельмейера, «это в десятки или сотни раз меньше, чем все остальное, что было измерено до сих пор». В эксперименте исследователи разместят две золотые сферы в нескольких миллиметрах друг от друга, одна из сфер будет прикреплена к небольшому пружинному магниту, а другая закреплена на конце микромеханического кронштейна. При включении

Квантовое пространство-время больше не может быть гладким непрерывным многообразием, которое описывается законами общей теории относительности. Оно будет крупнозернистым

электромагнита сфера на пружине начнет вибрировать, создавая изменяющееся гравитационное поле, которое, в свою очередь, заставит массу на кронштейне подпрыгивать вверх и вниз, как ныряльщик на доске. Движение кронштейна, отслеживаемое лазерами, будет существенно усиливать гравитационную силу сферы, прикрепленной к пружине, что облегчит обнаружение поля на фоне гравитационного поля Земли.

Отточив свои навыки гравитационного измерения с помощью обычных неквантовых масс, команда Аспельмейера должна будет потом заняться суперпозициями. Если бы Аспельмейер мог поместить две маленькие сферы в состояние суперпозиции, то он смог бы проверить, как взаимодействуют их гравитационные поля. Результаты могут указывать на то, что частицы были «запутаны», и это поддержит интуитивное предположение Фейнмана о квантовой природе гравитации.

Что же понадобится исследователям, чтобы выудить все эти эффекты? Для получения реального шанса создать квантовую суперпозицию Аспельмейеру нужно будет сжать свои миллиметровые гравитационные пробные массы до долей микрометра — уменьшить в 1 тыс. раз. В то же время ему понадобятся суперпозиции объектов достаточно массивных, чтобы иметь обнаруживаемые гравитационные поля. Для этого он, вероятно, воспользуется талантами своего коллеги из Вены, Маркуса Арндта (Markus Arndt), добившегося рекорда по величине объекта, когда-либо помещенного в суперпозицию: эталонной молекулы-бегемота, содержащей более 800 атомов. Вместо того чтобы прилипнуть к пружинам и кронштейнам, массы будут подвешены в пространстве с помощью так называемых оптических пинцетов — плотно сфокусированных лазерных лучей. Аспельмейер так комментирует этот эксперимент: «Если я смогу обнаружить гравитационное поле объекта, над которым я способен получить квантовый контроль, тогда я в деле. Это будет долгосрочная мечта, это случится не завтра и не через пять лет. Следуя как сверху вниз, так и снизу вверх — другими словами, стартуя или от уменьшения [гравитационных] масс, или от увеличения [суперпозиционных] масс, — мы думаем, что знаем, как добраться в нужную конфигурацию и свести эти две области вместе. Теперь нам просто нужно много работать».

Арндт, вероятный соавтор Аспельмейера, говорит, что эксперимент представляет собой множество проблем: небольшие сферические массы будет трудно изолировать гравитационно, они склонны к взаимодействию с любой близлежащей поверхностью. По его словам, «существует так много эффектов, которые будет трудно подавить». Однако тут же добавляет, что «все-таки необходимо постараться, всеми силами, ведь если мы не начнем сейчас, то это не будет сделано через десять лет». Арндт сравнивает усилия, которые потребуются, с поиском гравитационных волн — феномена, предсказанного общей теорией относительности Эйнштейна. Более трех лет назад гигантская Лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория (LIGO) наконец обнаружила первую гравитационную волну, но этому открытию предшествовал длительный период работы. По словам Арндта, «это была 40-летняя попытка запустить детектор гравитационных волн».

Последнее прибежище квантовых неудачников

Аспельмейер — не единственный физик, который работает над проблемой. В декабре 2017 г. две независимые группы одновременно опубликовали свои собственные очень похожие взгляды на мысленный эксперимент Фейнмана. Сугато Бозе (Sougato Bose), физик из Университетского колледжа Лондона, и его коллеги, а также Марлетто и ее оксфордский коллега Влатко Ведрал (Vlatko Vedral) описали способ проверки гравитационной запутанности между состояниями микроскопических частиц, находящимися в суперпозиции, без необходимости измерения их гравитационных полей.

В предлагаемом эксперименте пара алмазных сфер толщиной в 1 мкм были помещены в суперпозиции и в течение нескольких секунд падали бы в вакууме в гравитационном поле Земли. Если бы сферы находились достаточно близко друг от друга — на расстоянии около 100 мкм, по оценкам Бозе, — то их гравитационные поля должны были бы вызывать «запутывание» частиц. Случись такое, и свойства запутанных частиц будут мгновенно коррелировать способами, которые невозможны в классической физике. Например, спин одной частицы — независимо от того, направлен ли он вверх или вниз в магнитном поле, — будет меняться в противоположном направлении, как только будет измерен спин ее «спутанного» партнера.

Отслеживая, как часто происходят такие корреляции, Бозе считает, что 10 тыс. испытаний должны дать ответ. Он, Марлетто и Ведрал смогли бы определить, действительно ли упавшие алмазики «запутались». Опять же, свойство запутанности предполагает, что сама гравитация должна обладать квантовыми свойствами. По словам Бозе, «наша работа докажет, что гравитация квантовая в том смысле, что она подчиняется принципу суперпозиции». Эксперимент сталкивается со многими из тех же проблем, которые встали и перед Аспельмейером: необходимы большие суперпозиции, длящиеся несколько секунд и остающиеся достаточно близко друг к другу, чтобы гравитация могла их запутать. По словам Бозе, «такие требования очень усложняют эксперимент, но я уверен, что увижу его при жизни».

Оба эксперимента, окажись они удачными, дадут физикам первое косвенное доказательство того, что гравитация —

и, следовательно, само пространство-время — должны быть квантованы на планковской шкале энергий. И это захватывающая перспектива для Ровелли и других теоретиков квантовой гравитации, которые потратили годы, работая над теориями без какой-либо экспериментальной обратной связи. «Это меняет игру, эта идея, попытка увидеть квантовую гравитацию в лаборатории, — говорит Ровелли. — Насколько мы понимаем, [квантовая природа гравитации] определено должна быть реальной, иначе мы ничего не узнали бы о мире».

Спустя столетие после своего рождения квантовая механика остается самой неопостижимой из научных теорий. Некоторые физики, наиболее известный из которых Эйнштейн, сомневались, что она — последнее слово в нашем понимании природы реальности. И все же бесчисленные эксперименты подтвердили предсказания теории, в большинстве случаев с точностью до нескольких десятков знаков после запятой. В некотором смысле вопрос о квантовой или классической сущности гравитации представляет собой последнее прибежище для тех, кто чувствует, что должно быть что-то не так с квантовой механикой. Если эти настольные эксперименты увенчаются успехом, то их убежище рухнет.

«Квантовая теория учит нас совершенно другому способу описания природы», — говорит Аспельмейер. По его словам, «свод правил, который мы нашли с помощью квантовой теории, фундаментален и должен применяться в целом ко всем теориям, которые у нас есть».

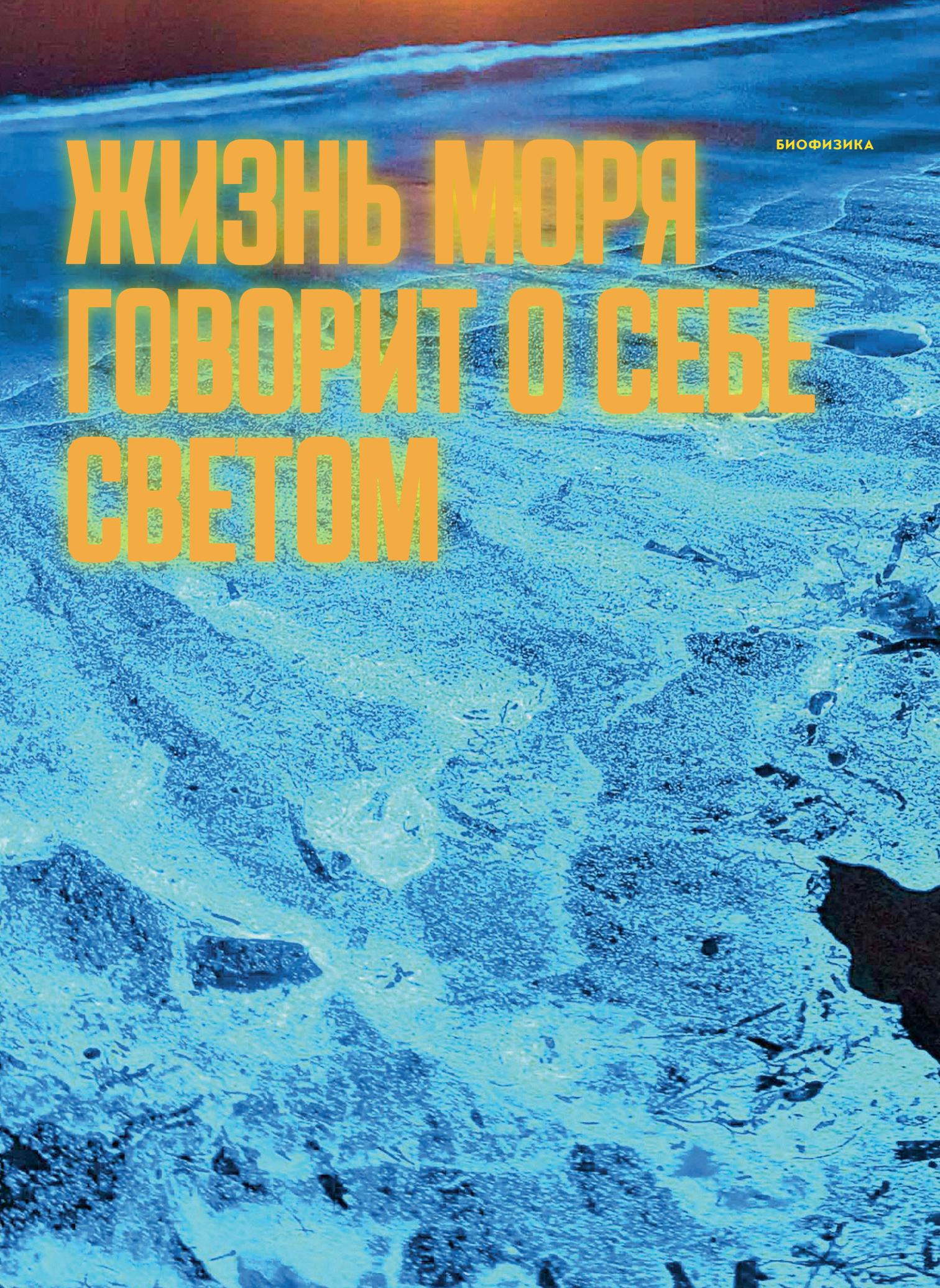
Перевод: О.С. Сажина

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Москович К. Запутанные пространством-временем // ВМН, № 5–6, 2017.
- A Micromechanical Proof-of-Principle Experiment for Measuring the Gravitational Force of Milligram Masses. Jonas Schmöle et al. in *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 33, No. 12, Article No. 125031; June 23, 2016. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0264-9381/33/12/125031>
- Gravitationally Induced Entanglement between Two Massive Particles Is Sufficient Evidence of Quantum Effects in Gravity. C. Marletto and V. Vedral in *Physical Review Letters*, Vol. 119, No. 24, Article No. 240402; December 15, 2017. Препринт доступен по адресу: <https://arxiv.org/abs/1707.06036>
- Spin Entanglement Witness for Quantum Gravity. Sougato Bose et al. in *Physical Review Letters*, Vol. 119, No. 24, Article No. 240401; December 15, 2017. Препринт доступен по адресу: <https://arxiv.org/abs/1707.06050>

БИОФИЗИКА

ЖИЗНЬ МОРЯ ГОВОРИТ О СЕБЕ СВЕТОМ



An aerial photograph of a wide, frozen river or delta system. The water is partially frozen, creating a complex pattern of white and light blue ice floes and channels. In the upper left, a small boat with a red light is visible on the open water. The overall scene is captured in a cool, blue-toned light, suggesting a winter or early spring setting.

Общее собрание Российской академии наук, которое состоялось в конце апреля этого года, ознаменовалось важным событием: в торжественной обстановке была вручена высшая награда РАН — Большая золотая медаль им. М.В. Ломоносова — академику **Иосифу Исаевичу Гительзону** за обоснование и развитие экологического направления в биофизике. Мы попросили нового лауреата рассказать, какими исследованиями он занимается.



Академик
И.И. Гительзон

— **Иосиф Исаевич, вы основоположник научного направления «биофизика над-организменных систем». Что это такое?**

— Скажем так: один из основоположников. Биология различает уровни организации живой материи. Живая материя — самое сложно организованное вещество в природе. В этой сложности самое простое — то, из каких молекул и как построены живые организмы, то есть какова их молекулярная организация. Выше идут клетки, это универсальная живая структура. Вся жизнь — клеточная, кроме вирусов. Еще выше находятся организмы, которые построены из множества клеток. Классическая биофизика и занимается в основном этими уровнями.

Но есть еще более сложные уровни организации жизни — сообщества организмов. Это популяции. Дальше организмы одного вида вступают в различные отношения с другими видами. Кто-то кого-то ест, кто-то с кем-то конкурирует. Это уже создает экологические системы из взаимоотношений разных видов организмов. И, наконец, над всем этим есть общее, единое — это биосфера Земли. Мы — человечество — входим в эту систему. Это не абстрактное понятие, а реальность, потому что из биосферы мы получаем питание, кислород, то есть мы привязаны к ней жесткой связью обмена веществ. В биосфере мы отдаем все свои выделения, которые кто-то должен взять, чтобы снова образовались пища и чистая вода, которую мы потом опять используем, и т.д. Биосфера объединяет всю жизнь на нашей планете.

— **Вы стали заниматься этим направлением, чтобы решить какую-то определенную задачу?**

— Мы идем от биофизики, то есть используем мощь физических методов, идей для исследования биологических систем, но не нижних уровней, где физика уже очень многое сделала. Естественно, что я, принадлежа к биофизике, буду говорить о том, что внесла физика в науку о жизни в XX в. Был открыт молекулярный механизм наследственности, знаменитая двойная спираль из нуклеиновых кислот. Это сделано физическими методами.

То, что делаем мы, — это попытка применить физические методы к исследованию высших форм организации жизни, то есть экологических систем. Что-то удастся на этом пути, но основная задача еще не решена: почему биосфера так устойчива? Она существует уже четвертый миллиард лет, изменяясь при этом, но жизнь на Земле сохраняется непрерывно. Что поддерживает ее равновесное состояние? Как это устроено? Вот мы дышим здесь, а где-то в тысячах километров от нас водоросли потребляют нашу углекислоту. При этом ее концентрация в атмосфере планеты остается почти постоянной, потому что между процессами в биосфере поддерживается динамическое равновесие.

Как работает этот механизм динамического равновесия? От него зависит жизнь на планете, в том числе и наша — человеческая. Высказываются опасения, что если уровень углекислого газа в атмосфере будет продолжать подниматься, то произойдет очень сильное потепление. Это спорный вопрос, но в любом случае ясно, что при всех колебаниях этого уровня будут изменяться условия жизни на Земле. На вулкане Мауна-Лоа на Гавайских островах есть обсерватория. Поскольку этот остров находится далеко в океане, на него меньше всего влияет мировая промышленность, поэтому в атмосфере нет местных загрязнений. Там меряют концентрацию углекислоты в атмосфере уже десятилетия. Она растет понемногу, но неуклонно. И это доказательство того, что биосфера находится не в равновесном состоянии. Подъемы эти невелики, непосредственно людям они еще не страшны. Человек может дышать при гораздо большей концентрации диоксида углерода. Но это влияет на атмосферу, ее температуру, а дальше запускается много процессов.

Поэтому очень важно понять, как организована биосфера и почему она в основном поддерживает равновесие. Хотя, конечно, есть колебания: скажем, в каменноугольный

период была совсем другая концентрация многих веществ, прежде всего углекислоты. А жизнь сохранилась и продолжает существовать.

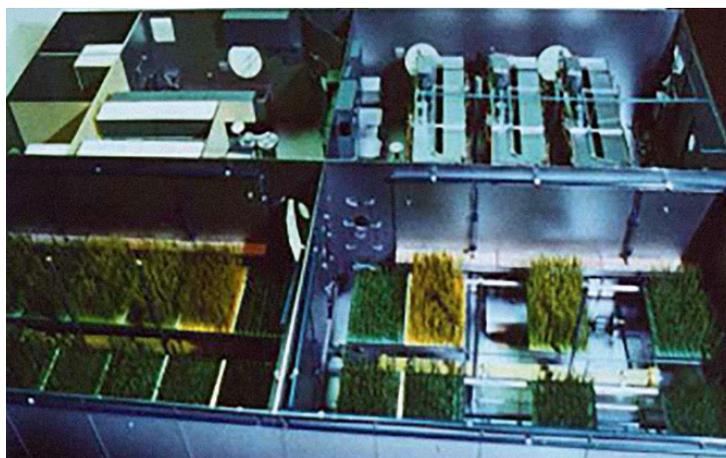
Каков механизм этого равновесия? Чтобы получить ответ на какой-то вопрос, ученый должен поставить эксперимент, задать этот вопрос природе. Как задается вопрос? Мы что-то меняем и смотрим ответ. Слава богу, что биосфера такая большая и ей нельзя так задать вопрос. И это очень хорошо, что мы не можем ее произвольно менять, хотя все же делаем это своими неразумными действиями — массой всяких выбросов, на которые нет потребителя, и пр. Экспериментировать на биосфере, скажем так, аморально. Она одна, а мы все в ней живем, мы все от нее зависим.

— Что же делать ученому, если он не может воспользоваться экспериментом в природе?

— Строить математические и физические модели своего объекта. Вот этим мы и занимаемся. Замкнутые системы круговорота веществ для жизнеобеспечения людей — и есть модели биосферы В.И. Вернадского, в которой живущие в ней люди участвуют не только своим обменом веществ, но и своим разумом, потому что они ею управляют. Из нее они получают пищу, туда выдают выделения. Это и есть наш модельный объект, замкнутая экологическая система (ЗЭС) жизнеобеспечения человека. Тут мы вольны что-то менять, смотреть ответ.

Наша фундаментальнейшая задача — понять механизм, обеспечивающий устойчивость большой земной биосферы, которой «управляет» человечество. Оно пока еще довольно хаотично это делает, поэтому мы наблюдаем такие разрушительные

последствия. Ноосфера, как называл В.И. Вернадский современный этап эволюции биосферы («ноос» — «разум» на классическом греческом языке), — это переход к такой ситуации, когда человек своими действиями вмешивается в круговорот в масштабах всей биосферы. Но пока эти вмешательства трудно назвать разумными, они скорее стихийные. Сейчас мы, например, расточительно пользуемся изделиями из химических синтезированных пластических материалов, используя их одноразово. А дальше куда их деть? Один раз использовали и выбросили в природу. Но, оказывается, в природе на них потребителей нет, поэтому пластики копятая в почве, попадают в реки. Реки несут в моря, моря — в океаны, и там теперь плавают целые мусорные острова. В наших исследованиях водородного биосинтеза мы разработали технологию и проект микробиологического производства биопластика, который разрушается в природе. То есть его можно один раз использовать и выбросить. В природе



Макет замкнутой экосистемы жизнеобеспечения людей «Биос-3», Институт биофизики СО РАН (вверху); И.И. Гительзон и профессор Г.М. Лисовский внутри «Биоса-3» (слева)

его всегда ждут бактерии, которые его съедят и скажут спасибо. Причем спасибо не виртуальное. Они вернут нам чистую воду.

— Кого-то из производителей заинтересовало изобретение биопластика, который разрушается?

— Абстрактно — да. Но дальше надо, чтобы кто-то занимался производством, а это миллионнотонное производство. В год в мире выпускается около 180 млн т разных пластиков, но не более 10% из них подвергается разложению. Мы не все пластики химического синтеза можем заменить биологическими. Но бытовые, которых так много и которые составляют большую долю отходов, можем.

— Многие страны сейчас запрещают использование пластика.

— Да, это началось. Но запретить — это самое простое. А что дальше? Тогда надо вернуться к стеклу, а стекло — еще более трудноразрушаемый материал. Тоже будет загрязнение. Поэтому очень важно производство биodeградируемых материалов. Но пока мои разговоры с теми, кто мог бы вложить средства, не привели к успеху. Я им говорю: «Если вы вложите в производство таких биodeградируемых, биоразрушаемых пластиков, вы будете архимиллиардером — новым Дюпоном, который создал когда-то промышленную химию».

Но знаете, что мне отвечают? И это уже несколько производителей. Они говорят: «А когда пойдет возврат? Когда я получу обратно деньги?» Я честно говорю: «Через восемь-десять лет, не раньше». Ответ: «На водке я сделаю это за восемь месяцев». Вот и все. Остается надеяться, что в России подрастет поколение более дальновидных инвесторов.

Говорю об этом с горьким чувством сожаления потому, что загрязнение суши и Мирового океана миллионами тонн неразрушаемых химических пластиков ежегодно возрастает, а ведь работы по технологии биосинтеза водородными бактериями мы вели еще в 1970–1990-е гг., и тогда уже лабораторией профессора Ф.Я. Сидько были разработаны варианты биотехнологий производства белка, перспективные для преодоления его дефицита, составляющего сегодня 1 млн т. В 1990-е гг. крайний дефицит средств прервал эти исследования. Удалось лишь сохранить направление работ на производство теми же водородными бактериями биodeградируемых полимерных материалов для реконструктивной хирургии благодаря незаурядной активности, поддерживаемой мегагрантами, профессора Т.Г. Воловой и работе ее лаборатории совместно с Сибирским федеральным университетом. Таким образом, научный потенциал пока сохранен, остается



Мусор попадает в океан и образует целые острова

Совместное с Сибирским федеральным университетом пилотное производство разрушаемых биопластиков: ферментационная линия Bioengineering



поддержать его материально, чтобы реанимировать направление технологии водородного биосинтеза белка и биополимеров. И тут нам не надо никого догонять, лидирующую позицию на научном фронте пока удается поддерживать.

Позволю себе поделиться своей оптимистической надеждой успеть принять участие в развертывании этой работы и успеть увидеть ее доведение до промышленности.

— Я прочитала, что методы, которые вы развиваете, послужили основой научных проектов. В частности, биолюминесценция Мирового океана. Что это такое?

— Этим вопросом вы обращаете меня ко второму направлению нашей работы по применению биофизических методов к исследованию экосистем, включая биосферу.

Повторюсь: первое направление, о котором мы говорили раньше, — это физическое моделирование экосистем — развитие «Биоса-3» (профессор А.А. Тихомиров) и параллельно — математическое моделирование (директор Института биофизики СО РАН академик А.Г. Дегерменджи) и лаборатория теоретической биофизики (профессор С.И. Барцев).

Второе направление — это использование возможностей, открываемых физическими методами для слежения за проявлениями жизни больших природных экосистем, вплоть до Мирового океана в целом. В этом направлении со мной многие годы работали профессор Л.А. Левин и профессор А.П. Шевырнов.

Есть такое явление — биолюминесценция. Это излучение света живыми организмами.

Такие организмы есть не только в море, но и на Земле — светляки, например. Плавающая в море, вы, наверное, видели вспышки. Вот это и есть биолюминесценция. Это основной голос жизни моря. Как говорил замечательный океанолог член-корреспондент РАН В.Г. Богоров: «Море светится — море живет».

Там не говорят, не производят звуков, не кричат. Голосом обладают дельфины, киты, но это млекопитающие, которые пришли с суши в море. Морские животные почти все немые. А вот светиться они могут, по крайней мере многие из них. И световой сигнал — это очень мощный способ отпугнуть хищника или привлечь партнера. Эволюция выработала и еще более сложные способы использования биолюминесценции. Бактерии излучают свет, чтобы их проглотили, потому что им гораздо лучше жить в кишечнике рыб. Там есть пища, защита, и они светят, привлекая рыб, чтобы их съели.

Чтобы изучать жизнь моря, очень важно научиться регистрировать биолюминесценцию — свечение морских организмов, по нему можно увидеть очень многое в жизни моря. Мы довольно хорошо научились ее регистрировать — от поверхности до максимальных глубин. У нас был прибор в великолепном титановом корпусе, который выдерживал давление в полторы тысячи атмосфер, то есть до максимальной глубины океана. Мы сделали несколько записей, но потом трос оборвался. И теперь этот уникальный прибор лежит вблизи самой большой глубины океана — в Идзу-Бонинской впадине в Тихом океане.

С ним ничего не будет, титан не разлагается в морской воде, это не железо и не сталь. Он пролежит столетия, тысячелетия. Я думаю, что когда-нибудь его найдут потомки и скажут: «Оказывается, наши первобытные предки и наукой занимались, а не только воевали». Вот в этом, может быть, когда-нибудь будет его польза. Но пока не получилось его повторить, это слишком дорого в сегодняшних условиях.

Основная жизнь в море существует не на больших глубинах. Конечно, очень интересно получить сигнал жизни с такой глубины и изучать ее по этим сигналам. В океане очень важны верхние 150 м, потому что основная жизнь сосредоточена в этом тонком слое. Причина в том, что сюда проникает солнечный свет и это обеспечивает возможность синтезировать новую биомассу. Ниже 150 м остается уже слабое солнечное свечение, его недостаточно для фотосинтеза. Поэтому очень важен верхний слой. Основные наши приборы — зондирующие биолюминометры — построены именно для него. Зондирование выполняется очень быстро. Прозондировать верхние 150 м зонд может за одну-две минуты. Он в режиме онлайн приносит данные о распределении жизни в этом слое. Таким образом мы решаем множество разных задач для биологов, показываем, как распределена жизнь, где слои жизни, где пустые слои. Наш прибор мы напрямую соединяем с их приборами, и тогда они своими орудиями лова могут захватывать

материал прицельно из гущи жизни, из пустот, сравнивать и изучать. Поэтому мы с нашей техникой всегда желанные гости на научном корабле. Но сейчас наш научный флот, как говорят моряки, обсох. К сожалению.

— Плохо дело с научным флотом?

— У нас был великолепный научный флот, десятки научных кораблей. Сейчас один-два — благодаря титаническим усилиям академика Р.И. Нигматуллина, многие годы директора, а сейчас научного руководителя Института океанологии РАН — выходят в море только недалеко, в Арктику. А раньше наши корабли ходили по всему миру и несли флаг нашей академии наук и, конечно, флаг родной страны. И когда мы заходили в разные порты, в некоторых из них наш флаг видели, может быть, в первый раз. Была такая традиция на корабле — день открытых дверей. Корабль открыт для посещений. И везде, где мы бывали, толпы местных жителей шли к нам на корабль, выстраивались длинные очереди. И знаете, что самое главное? Начинали уважать страну, потому что из нее пришел большой корабль, который не занимается ни торговлей, ни военными делами, никому не грозит и не ищет выгод, а представляет только науку. Умная, вызывающая уважение страна. Таковы были отзывы многих посетивших наш научный корабль туземцев тех далеких стран. Когда приходили во второй раз в то же место, нас уже встречали друзья. Надеюсь, это восстановится,



Зондирующий биолюминометр «Ромашка» с батометрами для прицельного взятия проб воды по измерениям биолюминесценции (слева). Глубоководный автономный биолюминометр покоится на дне Идзу-Бонинской впадины в Тихом океане (справа).



Чтобы изучать жизнь моря, очень важно научиться регистрировать биoluminesценцию — свечение морских организмов, по нему можно увидеть очень многое в жизни моря

потому что это разумно. К сожалению, сейчас нет этой очень важной гуманитарной функции научного флота.

— А какую еще информацию вы получаете из морских глубин?

— За годы экспедиций на научно-экспедиционных судах академии наук, начиная со знаменитого «Витязя», на судах рыболовного флота, гидрографической службы мы собрали огромный массив данных о биoluminesценции моря, создана первая карта биoluminesцентного поля Мирового океана, определен ряд его основных закономерностей, разработаны методы биoluminesценции моря вертикальным зондированием и на ходу корабля, предложен экспресс-метод обнаружения экстремальных состояний планктонных экосистем с помощью мобильных измерений биoluminesценции.

Предвидим еще множество возможных применений для изучения жизни моря посредством измерения биoluminesценции, ведь это его световой язык. Тут еще масса задач, потому что мерить мы научились хорошо, описывать тоже, но понимать этот язык еще почти не умеем. Мы регистрируем импульсы. Выходишь ночью в темноте на нос корабля и видишь вспышки. Ты стоишь, они тебе что-то кричат, а ты их не понимаешь. Мучительная ситуация.

— Как в фильме «Солярис». Как войти в контакт с Океаном...

— Как будто вы приезжаете в страну, языка которой не знаете. Надо изучить язык, и тогда откроется все самое интересное в этой стране. Понять световой язык морских организмов — это огромная биологическая задача. Только изучив его, можно сказать, что мы научились понимать язык жизни моря.

— Но хотя бы часть пути уже пройдена в решении этой задачи?

— Пройдена регистрация. Мы научились записывать, а понимать — практически еще очень ограничено. Ну как может идти научная работа, если наши корабли перестали ходить? Мы теперь исключены из этого процесса.

— А совместные международные проекты?

— Вероятно, они есть, но, поскольку мы сейчас со своей аппаратурой не ходим на кораблях, я просто этого не знаю. Вот когда ходили, мы участвовали в разных международных проектах, на наших кораблях работали группы ученых, особенно из той страны, куда мы заходили. Мы иногда там собирали группу. Были австралийцы, новозеландцы, индонезийцы, американцы...

— Было бы интересно получить картину экосистемы всего Мирового океана.

— Будем надеяться, что работы восстановятся. ■

Беседовала Ольга Беленицкая

АРХЕОЛОГИЯ

КТО ЕЩЕ ИСПОЛЬЗУЕТ ОРУДИЯ



Находки каменных орудий, оставленных
нечеловекообразными приматами,
проливают свет на происхождение
технологических изобретений

Майкл Хаслам



Макаки-крабеды на побережье Таиланда
пользуются каменными орудиями, чтобы
раскрыть раковину моллюсков

ОБ АВТОРЕ

Майкл Хаслам (Michael Haslam) — независимый исследователь из Лондона, изучающий эволюцию технологий у человека и других видов.



Во время прилива вода прибывает быстро, но обезьянам, похоже, все равно. Они дерутся или просто сидят, развалившись, на камнях и мангровых деревьях, расположенных чуть дальше вверх по берегу, пережевывая устриц или наслаждаясь грумिंगом. Подростки затеяли игру: прыгают с ветвей деревьев в теплое чистое море. Как и все на этом побережье в сельских районах Таиланда, они живут в соответствии с ежедневным ритмом приливов.

Меня же беспокоит, что вода прибывает. Это теплый декабрьский день 2013 г., и я, припав к земле около аккуратной квадратной ямы, пытаюсь дотянуться вниз так далеко, как только можно, чтобы выкопать еще одну лопатку, полную влажного песка. Ямка всего лишь по полметра с каждой стороны, но понадобились часы, чтобы ее выкопать, после того как отступила вода после ночного прилива. Неосторожное движение уничтожит все внутри, поэтому спешке здесь не место.

Это место археологических раскопок, и выглядит оно именно так, как вы можете себе представить: с ведрами, ситами, бечевками, уровнями, пакетами для сбора образцов и мерными лентами, разбросанными вокруг. И все же древние объекты, которые привели меня сюда, на маленький остров Пьяк-Нам-Яй в Национальном парке Лемсон, —

не обычные археологические находки. Я не ищу монеты, керамику, остатки древнего поселения или давно утраченной человеческой культуры. Я здесь ради древних следов культуры обезьян, широко представленных на этом пляже.

Я — археолог (по крайней мере, во время поездок), специализирующийся на приматах. Использую традиционные археологические методы, чтобы понять поведение разных видов приматов в прошлом. Передо мной часто возникает образ доктора Корнелиуса из фильма «Планета обезьян» 1968 г. — шимпанзе, который обнаруживает свидетельства того, что люди не всегда были безмолвными существами. За это открытие его обвиняли в ереси, и, хотя в фильме об этом не говорится, я подозреваю, что он также лишился финансирования. Корнелиус напоминает меня, так как мы с коллегами недавно создали новую область научных исследований, представляющую собой зеркальное отражение его работы. Более 150 лет термин «археология» описывали изучение материальных следов исключительно человеческого прошлого. В то время появилось множество различных направлений, в центре внимания которых находились определенные периоды, места или методы, но их все объединяла единственная центральная тема — изучение людей. Все иные виды животных были частью археологических исследований только в качестве пищи, транспортного средства, домашних животных или паразитов. Их рассматривали как спутников нашего мира.

Несомненно, такая направленность исследований привела к экстраординарным достижениям. Например, в 2015 г. Соня Харманд (Sonia Harmand) из Университета Стони-Брук и ее команда раздвинули временные рамки археологической летописи поведения человека более чем на 3 млн лет, когда обнаружили каменные орудия, оставленные

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Археологи традиционно были сосредоточены на исследовании материальной культуры представителей человеческого рода.
- Однако некоторые нечеловекообразные приматы, так же как и другие виды, используют орудия.
- В последние годы исследователи начали обнаруживать археологические свидетельства, относящиеся к таким существам.
- Подобные исследования должны выявить факторы, управлявшие развитием технологий, как у человека, так и у других видов.

нашими далекими предками на стоянке Ломекви в Кении. (Кстати, то, что эти орудия каменные, — не совпадение. Большая часть археологических свидетельств за несколько миллионов лет представлена каменными орудиями — единственными сохранившимися артефактами, на основании которых мы делаем выводы о нашем происхождении. Объекты, сделанные из менее прочных материалов, затерялись в веках.)

Обратив внимание на наших ближайших родственников — нечеловекообразных и человекообразных обезьян, археология приматов ставит перед собой цель создать более обширную основу для понимания длинной истории технологического развития человечества. Люди и наши прямые предки — конечно, тоже приматы, и раскрытие истории нашего собственного эволюционного пути — все еще основная цель этого исследования. Рассматривая удивительно сложное развитие технологий человечества в более широком биологическом контексте, мы сможем лучше понять, какие характерные черты относятся к общему наследию приматов, а какие по-настоящему уникальны.

Отсутствие свидетельств

Причина, по которой археологи традиционно сосредоточивались только на поисках следов человеческой материальной культуры, заключается в том, что очень долго исследователи полагали, что лишь люди использовали и производили орудия. Приматолог Джейн Гудолл (Jane Goodall) впервые доказала обратное в своих исследованиях шимпанзе, проводившихся в 1960-х гг. Антрополог Луис Лики (Louis Leakey) обнаружил ряд человеческих останков и каменных орудий вокруг древнего озера в Восточной Африке и хотел узнать, какого рода деятельностью могли заниматься предки человека. Поэтому Лики привлек к работе Гудолл, и она отправилась на территорию современного Национального парка Гомбе-Стрим на восточном берегу озера Танганьика в Танзании, чтобы наблюдать за поведением обитающих там шимпанзе. Хотя в конечном итоге ее открытия имели слабое отношение именно к этому озеру, наблюдения Гудолл за шимпанзе, создающими и использующими орудия для добывания пищи, навсегда изменили наше восприятие способностей приматов. Однако швейнфуртовские шимпанзе (*Pan troglodytes schweinfurthii*) в Гомбе пользовались орудиями, которые были сделаны исключительно из растений и в тропическом климате сохранялись всего несколько недель. Степень сохранности найденных Лики каменных орудий возрастом несколько миллионов лет и палок и приспособлений из травы, обнаруженных Гудолл, абсолютно различалась.

К счастью, шимпанзе очень изобретательны, и в 1970-х гг. исследователи обнаружили несколько групп этих животных, относящихся к западно-

африканскому подвиду (*Pan troglodytes verus*), использующих орудия для раскалывания лесных орехов. Данные генетики свидетельствуют, что этот подвид отделился от основной популяции шимпанзе, вероятно, полмиллиона лет назад. Если принимать во внимание, что шимпанзе из Центральной и Восточной Африки (как показали исследования в Гомбе) и родственный им вид бонобо (*Pan paniscus*) не используют каменные орудия, кажется вероятным, что с того времени обитающая на западе популяция независимо изобрела способ применения камней.

Это открытие поднимает ключевой вопрос о происхождении каменных орудий. Наш общий предок, вероятно, пользовался сделанными из растений приспособлениями, так же как поступают шимпанзе, бонобо, а также орангутаны и гориллы в дикой природе. Но почему только некоторые представители родословного древа приматов стали использовать в качестве материала камень? Более того, шимпанзе в дикой природе очень ограниченно пользуются камнями, в основном в качестве грубой силы, когда тяжелым камнем разбивают неподатливую ореховую скорлупу. С другой стороны, люди использовали камни для создания всего: от режущих орудий до наконечников копий, от украшений до пирамид Египта и Центральной Америки. Почему траектории технологического развития шимпанзе и человека так различаются?

На основе всего двух примеров применения каменных орудий, независимо изобретенных людьми и шимпанзе, трудно делать выводы об этапах, приведших к появлению такой технологии. Мы не можем просто спроецировать способы действий, свойственные для одной подгруппы шимпанзе, на наших древних предков и заявить, что технология, используемая человечеством, появилась в результате развития технологии раскалывания орехов с помощью каменного орудия. Это настолько же бессмысленно, как судить о предках шимпанзе по поведению группы современных людей.

Одна из основных проблем заключается в том, что свидетельств эволюции шимпанзе практически нет. Огромное количество данных ДНК-анализа шимпанзе и людей указывает, что расхождение человека и шимпанзе произошло примерно 7 млн лет назад. Однако единственные известные ископаемые останки шимпанзе — три зуба возрастом примерно полмиллиона лет. Возраст самых древних известных нам орудий, использовавшихся шимпанзе, — чуть больше 4 тыс. лет. В результате все наши познания о наших человекообразных родственниках ограничиваются вечным настоящим: все наши представления о них сформировались за последние несколько десятилетий. Если бы мы оценивали человечество в таких же коротких временных рамках, мы

получили бы отрывочные сведения о том, как появились и развивались наши технологии в процессе эволюции. Если бы нам пришлось догадываться, сочли бы мы, что лучше всего свойственные человеческому роду приспособления для приема пищи представляют палочки для еды — или же столовые приборы? А какова более примитивная форма человеческих игрушек — *PlayStation* или *Xbox*? Эти вопросы могут показаться абсурдными, но ученым зачастую не удается даже предположить, напоминало ли поведение шимпанзе в прошлом то, что мы наблюдаем сейчас. Были ли они менее умелыми? Или более?

Другая проблема в том, что сравнительный анализ человека и других приматов дает мало ответов на вопрос, почему определенные черты технологий появились у одних и отсутствуют у других. Например, еще в 1860-х гг. английский натуралист Джон Лаббок (John Lubbock), который ввел термины «палеолит» и «неолит» для периодизации каменного века, предположил, что раскалывание орехов приматами просто предшествовало появлению свойственного людям способа отбивки камней для получения режущих инструментов в виде осколков с острыми краями. Если так, то почему современные шимпанзе не скалывают камни? Связано ли отсутствие такого поведения с недостатком воображения, времени или возможности? В идеале, чтобы проверить наши гипотезы о развитии технологий, нужен более обширный материал тематических исследований. Здесь нам на помощь приходят обезьяны, изучением которых я занимаюсь.

Игры с камнями

Вернемся на пляж в Таиланде. Дно ямы наполняется водой: она просачивается со всех сторон, угрожая еще больше подмыть стенки. Я подключил лодочный насос к аккумулятору машины, чтобы понизить уровень воды, но битва проиграна. В конце концов, когда волны уже плещутся у моих ног, я аккуратно собираю комплект маленьких обломков вулканической породы с явными рубцами и ямками на шероховатой поверхности.

Благодаря работе приматологов Сучинды Малаивиджитпонд (Suchinda Malaivijitponond) из тайландского Университета Чулалонгкорна в Бангкоке и Майкла Гумерта (Michael Gumert) из Наньянского технологического университета в Сингапуре, проводившейся в течение последних десяти лет, известно, что бирманский подвид диких яванских макаков, или макаков-крабоедов (*Macaca fascicularis aurea*), обитающий на острове Пьяк-Нам-Яй и других островах вдоль побережья Андаманского моря, регулярно пользуется каменными орудиями. Такое поведение характерно также для макаков, обитающих дальше на севере, в Мьянме, где и было впервые описано в 1880-х гг. Альфредом Карпентером, капитаном британского морского

судна. Этот отчет, по-видимому, остался почти незамеченным, и только в начале 2005 г., во время проведения оценки последствий разрушительного цунами 2004 г. в Индийском океане, использование орудий макаками открыли заново.

Если принимать во внимание похожие наблюдения XIX и XXI в., использование макаками камней — по-видимому, закрепившееся поведение. Когда прилив отступает, обезьяны спускаются из лесов в глубине острова к воде. Они выбирают среди лежащих на берегу камней те, что размером с ладонь, и с их помощью разбивают и удаляют верхнюю створку раковины устриц, приросших к камням, обнажившимся во время отлива. Как правило, для того чтобы открыть каждую устрицу, требуется пять-шесть ударов, и макаки используют один и тот же камень снова и снова. В исключительных случаях моя команда наблюдала, как обезьяны использовали один каменный «молоток», чтобы очистить и съесть больше 60 устриц подряд.

Устрицы — не единственная пища, для добычи которой обезьянам требуются «инструменты». В приливных зонах, подобных этой, богатая фауна. Хотя макаки предпочитают устриц, они также ищут морских улиток и крабов. В отличие от устриц эта добыча может убежать, поэтому обезьяны собирают ее и относят к близлежащему плоскому камню. Потом они находят камень намного крупнее тех, которыми пользуются для раскалывания устриц (самые крупные весят несколько килограммов), и дробят им улиток и крабов на плоском камне, который используется как наковальня. В разгар пиршества воздух наполнен стуком камней и треском разламывающихся раковин и панцирей.

После таких набегов во время отлива берег усеян обломками раковин и оббитыми камнями. Обезьяны выбирают свои орудия со сноровкой и завидным постоянством: они используют заостренные края маленьких камней, чтобы точно ударить по раковине устриц, а крупные центральные зоны больших камней — чтобы разбивать улиток. При таких характерных моделях поведения на орудиях остаются предсказуемые повреждения, и мы с коллегами показали, что по следам износа, заметно отличающимся от следов на камнях, претерпевших естественные изменения, можно определить, как макаки использовали орудия. Я искал именно такие характерные повреждения во время раскопок в мягком песке на пляже. На обломках вулканической породы, спасенных мною от прилива, остались следы обработки устриц. Несмотря на то что эти артефакты не раздвигают временные рамки, в которых оценивается «древность» использования макаками орудий (возраст самых старых известных артефактов составляет 65 лет), они представляют собой первые орудия обезьян, найденные в результате археологических раскопок.



Дикий чернополосый капуцин в Бразилии использует каменное орудие для раскалывания орехов кешью (1). Камни с характерными рубцами и ямками, обнаруживаемыми и на орудиях современных капуцинов, найдены при археологических раскопках в слоях возрастом от 2,4 тыс. до 3 тыс. лет (2).

Капуцины и кешью

Макаки — не единственные нечеловекообразные приматы, которые оставляют археологические свидетельства.

Конец 2014 г. Я снова нахожусь около квадратной ямы, но на этот раз нет морского бриза, который бы смягчал жару. В полупустынном климате Национального парка Серра-да-Капивара на северо-востоке Бразилии меня окружают кустарниковые редколесья и возвышающиеся плато из песчаника. Команда из студентов — выпускников университета близлежащего Сан-Раймунду-Нонату копает, пока приматологи Тьяго Фалотико (Tiago Falótico)

и Лидия Лунц (Lydia Lunz), в то время постдоки под моим руководством, ведут учет находок. К счастью, здесь нет затапливающих приливов, только изредка встречаются скорпион или паук, недовольные тем, что мы ворошим подстилку из опавших листьев.

Мы находимся здесь, потому что дикие чернополосые, или бородатые, капуцины (*Sapajus libidinosus*), обитающие в парке, оказались искусными изобретателями. В 2004 г. эксперты по капуцинам Дороти Фрагашы (Dorothy Fragaszy) из Университета Джорджии и Элизабетта Визальберги (Elisabetta Visalberghi) из итальянского Института когнитивных наук и технологий сообщили, что

они наблюдали, как дикие капуцины, обитающие в сходных условиях примерно в 320 км отсюда, пользуются каменными орудиями. Теперь мы знаем, что капуцины, населяющие разные районы Бразилии, подбирают и используют каменные орудия, чтобы разбивать скорлупу орехов и твердую оболочку фруктов способом, поверхностно напоминающим поведение западных шимпанзе. Однако капуцины в Национальном парке Серра-да-Капивара особенно изобретательны. Помимо раскалывания орехов и фруктов, они также пользуются камнями для выкапывания земли в поисках спрятавшихся пауков и корней растений. Можно провести и еще одну параллель между этими капуцинами и их человекообразными родственниками: они выбирают и отламывают ветки, затем обдирают листья и зубами отдирают кору, чтобы получить нужного размера щуп, с помощью которого они охотятся на труднодоступную добычу, например на ящериц, спрятавшихся в расщелинах.

Во время раскопок нас интересует определенная еда обезьян. Анакардиум западный, или кешью, — эндемик в этом регионе Бразилии, хотя сейчас кешью выращиваются по всему миру в коммерческих целях. Орехи кешью вкусные и питательные, но в скорлупе сырых кешью содержится едкая жидкость, которая больно обжигает кожу. Поэтому капуцины используют тяжелые каменные «молоты» для раскалывания орехов. Такая тактика эффективна, и, на наше счастье, на орудиях остаются характерные следы и темная жидкость из скорлупы кешью. Обследуя и обозначая на карте места, где в течение нескольких лет накапливались каменные орудия капуцинов, мы смогли обнаружить участки леса, наиболее интенсивно используемые обезьянами. Поскольку состав почвы, влажность

и освещенность, подходящие для произрастания кешью, не изменились значительно за последние несколько тысяч лет, мы сделали вывод, что, вероятно, капуцины и в прошлом использовали орудия на тех же участках, что и сегодня. Наши раскопки в некоторых из таких зон подтвердили это предположение. Мы обнаружили следы применения орудий обезьянами в прошлом, относящиеся по меньшей мере к четырем разным периодам, о чем свидетельствуют группы захороненных под землей каменных «молотов» и «наковален» с явными следами повреждений в результате использования. Вывод о том, что эти орудия принадлежали капуцинам, подкрепляется тем, что мы не обнаружили следов человеческой деятельности: ни кострищ, ни керамики, ни каких-либо каменных орудий, характерных для человека.

Возраст наиболее древнего слоя с орудиями капуцинов составляет от 3 тыс. до 2,4 тыс. лет. Таким образом, за пределами Африки это старейшие известные артефакты, оставленные не человеком, и они характеризуют поведение обезьян, живших задолго до вторжения европейцев в Северную и Южную Америки. Во время раскопок мы не обнаружили каких-либо свидетельств использования орудий из растительного материала, но, так же как и в случае с человеком и другими человекообразными обезьянами, это связано, вероятно, с тем, что камни сохраняются лучше, чем палки.

Обнаружение во время археологических раскопок орудий, принадлежащих другим видам обезьян, само по себе было бы достаточной наградой за наши усилия. Но капуцины из Национального парка Серра-да-Капивара приготовили нам еще один сюрприз. В тот же полевой сезон я снял на видео обезьян, разбивающих камни-«молоты» о другие камни, включенные в глыбу конгломерата. Казалось, они старались создать кварцевую пыль, которую потом слизывали или вдыхали. Такое поведение наблюдали раньше и другие исследователи, но когда я собрал разломанные кусочки породы и провел раскопки вокруг глыбы, то заметил нечто, о чем ранее не сообщалось: осколки породы, отколотые капуцинами, вне всяких сомнений напоминали каменные сколы, найденные на некоторых стоянках древних предков человека. Детальный анализ камней, проведенный другим моим постдоком в Оксфордском университете, Томосом Проффитом (Tomos Proffitt), доказал, что мы обнаружили первый пример намеренного откалывания камней нечеловекообразными приматами, в результате которого получают сколы с острыми краями.

Внесем ясность: пока еще не наблюдалось, чтобы капуцины пользовались полученными острыми сколами. До настоящего времени в дикой природе такое поведение свойственно исключительно людям. Но если повторяющееся скалывание каменных «молотов» может быть побочным продуктом

немыслимой доселе деятельности — получения пыли для приема внутрь, — тогда эта находка ставит под сомнение определенные разделы археологической летописи древнего человека. Археологам свойственно считать, что древние люди намеренно скалывали камни, чтобы получить осколки с острыми краями для определенных целей, например для разрезания мяса. Принимая во внимание наблюдения за капуцинами, нам тем не менее следует спросить себя: может быть, 3 млн лет назад наших предков так же не интересовали созданные ими заостренные камни? Создавали ли они такие сколы случайно в течение какого-то периода, пока не поняли, что их можно собирать и использовать для разрезания? Если честно, мы не знаем. Но пока мы должны по крайней мере рассматривать такую возможность. Так, несомненно, было бы проще воспринимать как изобретение использование режущих инструментов, если уже существовал известный и проверенный способ производства орудий, когда произошел концептуальный переход и сколы с острыми краями превратились из опасных отходов в ценный ресурс.

За пределами отряда приматов

Каковы бы ни были уроки нашей собственной технологической эволюции, находки в Бразилии и Таиланде означают, что теперь имеются археологические свидетельства для трех линий нечеловекообразных приматов. Давайте остановимся на секунду и рассмотрим этот факт. Всего лишь десять лет назад мы узнали о существовании использующих каменные орудия диких нечеловекообразных обезьян. Теперь мы делаем первые шаги к тому, чтобы проследить такое поведение в глубину веков. Находки, относящиеся к человеку, сегодня составляют только четверть всей известной археологической летописи приматов, хотя к настоящему времени представляют собой наиболее изученную ее часть.

В недавно опубликованной статье мы с коллегами высказали предположение, что антропоцентрическая археология подошла к концу, в дальнейшем в поле зрения археологии будет находиться поведение всех видов животных в прошлом. Некоторые ученые могут не согласиться с моей точкой зрения, что археология — это всего лишь метод, применимый для изучения любого животного, оставляющего материальные свидетельства своей жизни, а не предназначенный исключительно для исследования человеческого рода. Однако работы небольшой группы приматологов-археологов показали, что археология может открыть новые подходы к рассмотрению нашего собственного эволюционного пути и пути развития других видов. Совершенно ясно, что технология — умелое и осознанное включение материальной культуры в нашу жизнь — это необычное явление, характерное

не только для человека. Для развития технологии не обязательно требуются речь или свойственные человеку способы обучения и кооперации, или даже большой мозг: размер мозга взрослого капуцина или макака составляет примерно 5% от размера мозга взрослого человека.

Более того, применение каменных орудий независимо возникает как минимум четыре раза в эволюции приматов в относительно недавнем прошлом в разной среде: на побережье (макак), на берегу озера (человек), в лесу (шимпанзе) и в полуаридной зоне (капуцин). Такое разнообразие означает, что можно ожидать, что такое же поведение периодически возникало в прошлом во многих таксонах приматов, даже если сейчас оно не проявляется или эти таксоны вымерли. Радует, что если подобный сценарий верен, то каменные орудия, использовавшиеся этими таксонами, ждут своего открытия.

Нет причин останавливаться только на приматах. В последние несколько лет мы совместно с этологом Натали Уомини (Natalie Uomini) из Института изучения истории человечества Общества Макса Планка в Йене и другими коллегами из Окенаариума Монтерей Бей и Калифорнийского университета в Санта-Крузе начали археологическую работу, связанную с использованием каменных орудий дикими каланами, или морскими выдрами, на Западном побережье США. Например, мы выяснили, что каланы постоянно возвращаются к излюбленным местам вдоль побережья, где раскалывают раковины моллюсков, оставляя после себя поврежденные камни и крупные кучи из выброшенных раковин, которые легко принять за мусорные кучи из ракушек или отвалы, оставленные доисторическим человеком. Обратная связь между этими стойкими следами на берегу и молодыми животными, обучающимися применению орудий, может представлять собой важнейший компонент технологических традиций каланов, во многом напоминающий существующую взаимосвязь между кешью и чернополосыми капуцинами.

Мы с Натали Уомини провели также полевые археологические исследования новокаледонских воронов (*Corvus moneduloides*), знаменитых своим умелым использованием орудий и когнитивными навыками. Новокаледонские вороны регулярно появляются в одних и тех же местах, добавьте к этому орудия из прочного материала — и получите все необходимые компоненты для формирования и сохранения археологических объектов, позволяющих реконструировать поведение животных в прошлом. Археология — это поистине междисциплинарная наука, и радует, что теперь к объектам исследования добавляется использование орудий древними животными, что вполне объяснимо.

Появление археологии приматов случайно совпало с выходом новых фильмов из серии «Планета

обезьян». В этих фильмах наши человекообразные родственники разрабатывают примитивные технологии, которые тем не менее быстро превосходят все известные технологии диких животных, существующие в реальном мире. Даже для создания обычного составного копыя из древка с приделанным к нему острым наконечником требуется когнитивный скачок. Среди орудий современных диких человекообразных обезьян подобного не наблюдается. Показанные в этих фильмах контролируемое использование огня и ношение украшений — также необычные атрибуты человекообразных обезьян. В реальности не существует известных примеров такого поведения среди не относящихся к человеческому роду животных.

Однако использующие технологии человекообразные обезьяны, которых мы видим на экране, не кажутся диковинными. Они даже в чем-то правдоподобны. Западноафриканские шимпанзе создают цельные копыя, которыми атакуют мелких приматов, так же как капуцины охотятся на ящериц. Уильям Макгрю (William McGrew) из Сент-Андрусского университета в Шотландии, самый компетентный исследователь в вопросах, касающихся использования орудий шимпанзе, и один из первых сторонников археологии приматов, однажды сообщил о том, что восточноафриканский шимпанзе носил «ожерелье» из завязанной обезьяньей кожи. Что еще может происходить, когда за этими животными не следуют люди со своими ноутбуками?

Археология человека стала достоверным источником информации о наших развитии и разнообразии — результат потраченных более чем за столетие усилий тысяч ученых и миллиардов долларов. Наградой за эти усилия оказались свидетельства материальной культуры за миллионы лет, которая может служить сценой для наших эволюционных теорий и сценариев. Мы только начинаем работу по созданию такой структуры для других видов животных. Кто знает, что мы можем обнаружить, если подойдем к работе непредвзято? Настало время для раскопок следующей квадратной ямы. ■

Перевод: С.М. Левензон

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Вонг К. Новые данные о зарождении технологий // ВМН, № 7, 2017.
- Archaeological Excavation of Wild Macaque Stone Tools. Michael Haslam et al. in Journal of Human Evolution, Vol. 96, pages 134–138; July 2016.
- Pre-Columbian Monkey Tools. Michael Haslam et al. in Current Biology, Vol. 26, No. 13, pages R521–R522; July 2016.
- Wild Monkeys Flake Stone Tools. Tomos Proffitt et al. in Nature, Vol. 539, pages 85–88; November 2016.

Устрицы проходят проверку
в экспериментальных конфигурациях
для создания береговой линии около
Бофорта, штат Северная Каролина

ПО ТУ СТОРОНУ



ИНФРАСТРУКТУРА

ДАМБ

Укрепленные заболоченные участки могут защитить береговую линию лучше, чем сооружения из твердых материалов

Роуэн Джейкобсен

ОБ АВТОРЕ

Роуэн Джейкобсен (Rowan Jacobsen) — автор книг «География устриц» (*A Geography of Oysters*), «Живой берег» (*The Living Shore*) и др. Его статья о генах вымерших растений вышла в прошлом номере нашего журнала.



Д

вадцать седьмого августа 2011 г. ураган «Айрин» пронесся по территории Северной Каролины, опустошив Внешние отмели. На цепь барьерных островов вдоль материка обрушились ливни, заливающие водой по колено, и трехметровые штормовые волны. В результате были уничтожены дороги и 1,1 тыс. домов.

Молодой эколог Рэйчел Гиттман (Rachel K. Gittman) из Университета Северной Каролины в Чапел-Хилле решила провести обследование поврежденных штормом зон. Гиттман работала консультантом по охране окружающей среды в ВМС США над проектом по укреплению береговой линии и была поражена, когда узнала, насколько мало имеется информации об устойчивости берега к внешним воздействиям. «Чем больше я изучала, тем больше понимала, что мы просто многого не знаем, — объясняет Рэйчел. — Так много управленческих и политических решений принимается без опоры на научное знание». Рэйчел решила специализироваться на береговых линиях.

То, что обнаружила Гиттман, стало откровением. Вдоль сильно пострадавшей береговой линии три четверти подпорно-волноотбойных стен были повреждены. Стены, как правило, из бетона и высотой около 2 м, — это стандартная защита домов от моря во многих регионах страны. Однако ни одна береговая линия с естественными болотами не пострадала. После урагана «Айрин» ни наносы, ни высота маршей, простирающихся вдоль берега на ширину от 10 до 40 м, не изменились. Несмотря на то что сразу после шторма плотность растительности маршей уменьшилась больше чем на треть, в большинстве случаев год спустя растительность полностью восстановилась.

Исследование Рэйчел Гиттман подтвердило подозрения многих экспертов. «Бронированные»

береговые линии, такие как подпорно-волноотбойные стены, защищают от крупных штормов намного хуже, чем полагают. Не рассеивая, а отражая энергию волны, они, как правило, изнашиваются у основания и поэтому постепенно отклоняются в сторону моря. При обычных штормах такие сооружения все еще выполняют свою функцию, но когда их накрывают высокие штормовые волны, в стенах образуются бреши или они разрушаются — и участки берега оказываются беззащитны перед морем.

В ходе проводившегося позднее исследования Гиттман и другие ученые провели опрос 689 собственников домов на побережье и выяснили, что на 37% недвижимости, защищенной подпорно-волноотбойными стенами, пришлось 93% повреждений. А годовые расходы владельцев на обслуживание таких сооружений были, как правило, в четыре раза больше, чем расходы жителей, полагающихся на природу. Стихия затронула соленые марши, но не разрушила.

В последние годы все больше ученых и политиков приходят к выводу, что «живые береговые линии» — естественные сообщества соленых маршей, мангры, устричные и коралловые рифы — могут быть удивительно эффективны в борьбе, которую жители побережья проигрывали годами. Целостность берегов США нарушается в результате наводнений и эрозии в угрожающих масштабах, вызванных повышением уровня моря,

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Удивительные данные показывают, что во многих районах марши защищают береговую линию лучше, чем стены, и их создание обходится дешевле.
- Ученые совершенствуют методы для восстановления уничтоженных заболоченных участков, создавая индивидуальные конфигурации для каждой береговой линии.
- Правительства и специалисты по чрезвычайным ситуациям начинают уделять больше внимания «живым» береговым линиям и увеличивают финансирование мероприятий по их восстановлению.



Ученые осматривают устриц, прикрепившихся к «ловцу устриц». Материал на основе джута и цемента предназначен для обеспечения процветания сообществ молодых и взрослых устриц, защищающих марши.

усиливающимися штормами и безудержным развитием. Каждый день волны отвоевывают по 89 га территории. Каждый год уничтожается недвижимость на сумму \$500 млн. Кроме того, около 40% береговой полосы США подвержено эрозии. В некоторых регионах потери просто невероятны. Зайдите в приложение *Google Earth Engine's Timelapse* и посмотрите: барьерный остров Шеклфорд-Банк тает, как мороженое на тротуаре летом.

Исторически сложилось так, что почти все средства на берегоукрепление вкладывали в «серую» инфраструктуру: дамбы, подпорные стены, насыпи и каменную облицовку. Ситуация постепенно меняется по мере того, как исследователи совершенствуют оценку долгосрочных эффектов от использования «зеленых» береговых сооружений. Страховые компании и правительства наконец начинают обращать внимание на эти методы и могли бы способствовать использованию «живых» укреплений.

Водно-болотные угодья лучше стен

Примерно в то же время, когда ураган «Айрин» бушевал на Восточном побережье, Майкл Бек (Michael W. Beck), профессор-исследователь Калифорнийского университета в Санта-Крузе, в то время ведущий специалист по изучению морской среды в организации «Охрана природы» (*The Nature Conservancy*), начал совместную со страховыми компаниями работу, которая сегодня может изменить подход к сохранению прибрежных районов. «Многие говорили, что природные экосистемы способствуют защите от наводнений, но доказательств было недостаточно», — рассказывает мне Бек в своем офисе в Санта-Крузе. Физические механизмы были ясны: устричные и коралловые рифы снижают ущерб от эрозии и наводнений, поскольку действуют как естественные волноломы, за счет складчатой поверхности рассеивая энергию волны. Соленые марши и мангровые леса с их надводными

береговыми террасами и создающими трение стволами могут на 50% поглотить энергию штормовых волн менее чем на 15 м территории.

Несмотря на то что ученые понимали физические основы, никто не предоставил информацию в таком виде, чтобы ею могли воспользоваться лица, принимающие решения. Бек решил это исправить. «Если я хочу изменить ситуацию, то не могу просто принести свою модель экосистемы в Федеральное агентство по чрезвычайным ситуациям (*FEMA*) или Инженерный корпус армии США, — объясняет Майкл. — Я должен рассматривать их модель риска и встраивать в нее экосистему».

Бек и его коллеги начали сотрудничать со страховым объединением *Lloyd's of London*, страховой компанией *Swiss Re* и другими представителями страховой индустрии, обладающими наиболее полными данными об имуществе и лучшими в мире моделями оценки рисков. Когда Бек подставил данные по прибрежным экосистемам в их модели оценки риска, стало ясно, что «живые» береговые линии представляют собой отличную защиту. Бек отмечает: «Когда я сообщил Инженерному корпусу, *FEMA* и банкам развития, что это цифры страховых компаний, то автоматически обеспечил иной уровень доверия к своим данным».

В рамках первого исследования ученые сосредоточились на ущербе, нанесенном ураганом «Сэнди», обрушившимся в 2012 г. на штаты Нью-Йорк и Нью-Джерси. В сотрудничестве с *Risk Management Solutions*, ведущей фирмой по моделированию рисков, ученые показали, что заболоченные участки предотвратили ущерб от наводнения после шторма в размере \$625 млн. Это удивительный результат, особенно если учитывать, что берега в этом регионе утратили со временем от 60 до 90% защитных заболоченных участков. Несколько сохранившихся заболоченных зон сократили ущерб от наводнения в затопленных районах в среднем на 11%. Настолько же важной

оказалась способность к созданию защитной зоны при обычных наводнениях: по данным одного локального исследования, недвижимое имущество, расположенное в зонах с сохранившимися маршами, страдало от ежегодных наводнений на 16% меньше, чем в зонах, где марши исчезли. «Это вполне вписывается в допустимые рамки, когда можно рассчитывать на снижение размеров [страховых] взносов», — указывает Бек.

Затем Бек с коллегами применили экономические модели и модели управления рисками к побережью Мексиканского залива (от Техаса до Флориды), на которое регулярно приходятся удары крупных штормов. Они выполнили изнурительный анализ ежегодно ожидаемых выгод и издержек при использовании всех типов инфраструктуры. По оценкам ученых, если не принять меры, то за 20 лет потери составят \$134 млрд. Возведение домов могло бы сократить ущерб на \$39,4 млрд, но это невероятно дорого. Учитывая, что строительство каждого дома в среднем обходится в \$83 тыс., придется затратить \$54 млрд, чтобы предотвратить ущерб в размере \$39 млрд. Дамбы высотой 6 м, возводимые в Луизиане, — еще менее удачное решение: при затратах \$33 тыс. на строительство 1 м дамбы это неоправданно дорогой способ защиты недвижимости в довольно ограниченных масштабах, когда на каждый \$1 сбережений приходится \$4 затрат. Менее высокие дамбы, возведенные на суше напротив многих поселков, расположенных в низинных прибрежных районах, почти при тех же затратах предотвратили намного более серьезный ущерб.

Если исходить из соотношения выгод и затрат, мешки с песком оказались наиболее удачным вложением: при затратах \$0,84 млрд предотвращенный ущерб составил бы \$8,4 млрд. Естественные защитные сооружения тоже оказались более выгодны. Восстановление заболоченных участков, которые могут предотвратить потери в размере \$18,2 млрд, стоило бы всего \$2 млрд. При затратах \$1,3 млрд на восстановление устричных рифов размер потерь сократился бы на \$9,7 млрд.



Экологи, в том числе Рэйчел Гиттман (в белом), измеряют уровень воды и высоту трав на острове Каррот, штат Северная Каролина

Восстановление барьерного острова может предотвратить ущерб в размере \$5,9 млрд при затратах в \$1,2 млрд. А восстановление пляжей (пополнение истощенных пляжей за счет песка, вычерпанного со дна моря) в восточной части Мексиканского залива могло бы уменьшить потери на \$9,3 млрд при затратах в размере \$5,5 млрд.

Последняя из перечисленных мер удивила многих, так как ежегодную замену песка на пляже часто считают пустой затеей. «Если бы мне пришлось выбирать только между восстановлением пляжей и совершенно "серой" инфраструктурой, — говорит Бек, — я бы выбрал восстановление как меньшее из двух зол».

В целом исследование показало, что размер ущерба (\$134 млрд) можно с оптимальными затратами сократить на \$57,4 млрд — и в основном за счет «зеленой» инфраструктуры.

В исследовании не рассматривался один вариант восстановления: масштабный отвод Миссисипи. Отвод насыщенной наносами Миссисипи через промежуток между дамбами, чтобы наносы проникали в проблемные марши, может помочь восстановлению высоты и жизнеспособности маршей, но регион истощается так быстро, что даже знаменитые мутные воды Миссисипи не спасут его от наступления моря. «Воссоздать заново всю экосистему дорого, — считает Бек. — Проще и дешевле начинать на более раннем этапе».

Восстановление длинных песчаных берегов с оптимальными затратами тоже может стать проблемным. Пляжи и барьерные острова по своей природе недолговечны. Посадка трав для восстановления дюн может помочь сохранению пляжей, но во многих случаях только временно. В какой-то момент жителям придется переезжать все дальше от отступающей в сторону суши береговой линии.

Бек поспешно подчеркивает, что берегозащитные сооружения по-прежнему важны и во внимание принимается не только рентабельность. «В тех местах, где живут люди и имеются важные объекты недвижимости, — говорит он, — варианты с использованием природных экосистем будут

сочетаться с какой-нибудь формой защитных сооружений». В крупных городах, портах и других районах, где допустимая степень риска масштабного наводнения должна быть крайне низкой, дамбы необходимы, даже если затраты на эти сооружения не оптимальны. И все же, считает Бек, определенные населенные районы могут выиграть от применения комплексного подхода: «Даже если строить дамбы, то можно сделать их ниже, если они расположены позади маршей».

Береговые линии: пробы и ошибки

Одна из причин, по которой «живые» береговые линии становятся экономически выгодным методом защиты берегов, заключается в том, что у исследователей и муниципалитетов все лучше получается их восстанавливать. Первые проекты по восстановлению маршей, в которых в соответствии с рекомендациями из области лесоводства каждому растению предоставлялось широкое пространство во избежание конкуренции, в действительности оказались непродуктивны. По словам Брайана Силлимэна (Brian Silliman), эколога из Дюкского университета, выяснилось, что когда в приливных полосах растения маршей находятся рядом, они совместно используют кислород и поэтому скорость их роста увеличивается вдвое. Высадите такие растения в виде крупных скоплений, и скорость роста каждого растения увеличится втрое. Добавьте голубых крабов, питающихся улитками, которые, в свою очередь, питаются травами соленых маршей, и растения будут чувствовать себя еще лучше.

Ученые также установили, что самые благоприятные условия создаются, когда у маршей есть волногасящее покрытие — берма вдоль берега, расположенная перед обращенным к морю краем растительности. Высоту и местоположение такой волногасящей бермы, созданной из твердого материала, такого как ракушки, камни или бетон, обычно выбирают так, чтобы во время прилива она была покрыта водой, но обнажалась во время отлива. Берма принимает на себя основной удар волны, но также задерживает ил, обеспечивая условия для буйного роста трав и восстановления или даже увеличения высоты отложений дна маршей.

Берму можно создать практически из любого твердого материала. В крупных проектах по укреплению береговой линии используются большие валуны или штабелированные бетонные блоки. Такую практику критикуют некоторые эксперты, указывая, что в этом случае от «живых» береговых линий остается только название. Однако во многих менее известных проектах по восстановлению волногасящие покрытия интегрированы в естественную среду более органично. На Юго-Востоке США и побережье Мексиканского залива марши исторически обладали естественным волногасящим покрытием в виде литорального устричного

рифа. Многие из подобных рифов чрезмерно использовали для сбора устриц много лет назад, разрушив волногасящее покрытие, и в результате марши подвергались эрозии.

В этих теплых водах, благоприятных для устриц, можно сформировать новые волногасящие покрытия, если вдоль линии наибольшего отлива на передней границе маршей поместить твердый субстрат, к которому прикрепляются молодые устрицы. На некоторых участках, подверженных сильному воздействию волн, использовались маленькие полые бетонные блоки или пластиковые сетки («сетки для лука»), связанные вместе и набитые раковинами. В случае успеха такие искусственные материалы быстро покрываются устрицами и исчезают в щелях растущего рифа. Но бетон часто виден в течение многих лет, а сетки подвергают критике в связи с разрушением и рассеиванием пластика в окружающей среде.

Рэйчел Гиттман, ныне работающая в Восточно-Каролинском университете, проводит испытания альтернативного материала под названием «ловец устриц», состоящего из джутовой ткани, которую погружают в портландцемент и сворачивают в виде полых структур разной конфигурации. Затвердевшие структуры обладают большой площадью поверхности для сбора личинок устриц. Легкий и гибкий, этот материал сохраняется достаточно долго, чтобы дать начало новому рифу, а потом разлагается. «Ловец устриц» прошел первую серьезную проверку, когда прошлой осенью на Северную Каролину обрушились ураганы «Флоренс» и «Майкл». «Майкл» разметал сетки с раковинами по маршам, но рифы из «ловцов устриц» не сдвинулись с места. Это была вдохновляющая демонстрация, но Гиттман беспокоится, что экологи могут преувеличивать потенциал материала: «"Живая" береговая линия не спасет ваш дом от шторма пятой категории. Хотя и подпорно-волноотбойная стена тоже».

И Рэйчел Гиттман, и Майкл Бек подчеркивают, что необходимо приспособливать «живые» береговые линии к местным условиям. Одна из причин, почему затраты на восстановление устричных рифов на Юго-Востоке и побережье Мексиканского залива так эффективны, заключается в том, что в этих регионах воды богаты устрицами для заселения новых рифов. Но в большинстве районов страны ситуация другая. Например, Чесапикский залив давно служил наглядным примером бесполезных усилий по восстановлению устриц. Численность популяции устриц в заливе уменьшилась и составляла менее 1% от исторической нормы, а в результате затраченных за десятилетия усилий и десятков миллионов долларов ситуация не сдвинулась с мертвой точки.

Бек рассказывает: «В принципе, Чесапикский залив — не лучшая наша модель. Из-за ситуации

с ним стало казаться, что восстановление устричных рифов — очень трудный и затратный процесс. Но чего ожидать, когда работаешь с системой, в которой от популяции остался всего 1%? Это нелегко. Совершенно другая история в Мексиканском заливе, когда у вас все еще имеются 50% рифов. Если создать новые, то устрицы появятся».

Майкл Бек делает такой же вывод и в отношении коралловых рифов. «Коралловые рифы — это единственная наиболее эффективная экосистема для снижения риска наводнений», — говорит Майкл. Кораллы, в процессе эволюции приобретшие способность выдерживать ежедневные удары волн, которые уничтожили бы большинство других живых существ, формируют естественные дамбы именно там, где требуется: недалеко от берега, напротив курортов, прибрежных городков, дорог вдоль побережья и другого ценного имущества. Здоровые кораллы создают исключительно эффективные волноломы, снижающие энергию волны чуть ли не на 97%. Кроме того, кораллы — вполне по средствам: восстановление 1 м кораллового рифа стоит в среднем \$1,3 тыс. вместо \$20 тыс. на возведение 1 м искусственного волнолома. Оценка мероприятий по смягчению связанных с изменениями климата рисков, проведенная страховыми компаниями для Карибского моря, показала, что рентабельность восстановления рифов и мангровых лесов на порядок выше по сравнению со строительством дамб или волноломов.

Даже в том случае, если рифы тянутся вдоль не очень большой части берега, ежегодно они будут приносить значительную выгоду: более \$100 тыс. только в США и более \$400 млн в Мексике, Малайзии, Индонезии, на Филиппинах и на Кубе.

Конечно, многие коралловые рифы нездоровы, а при снижении высоты рифа всего на 1 м непосредственный ущерб от наводнения увеличивается вдвое. Только по одной этой причине, считает Майкл Бек, будет расти число проектов по восстановлению рифов. Несмотря на то что восстановление коралловых рифов — недавнее направление, его потенциал огромен, если только риф уже не разрушился. «Некоторые кораллы растут очень быстро, — рассказывает Бек. — Например, в Индонезии в тех местах, где сохранились хорошие условия обитания и много здоровых кораллов вокруг небольших участков рифа, уничтоженных из-за использования динамита для рыбного промысла, рифы могут восстановиться достаточно быстро».

Растущая волна поддержки

Возможно, восстановление берегов наконец привлечет внимание, которого оно заслуживает. «Ситуация действительно начинает меняться», — говорит Бек. Армейский корпус, в течение десятилетий отдававший предпочтение проектам

с искусственными сооружениями, приступил к реализации инициативы «Инженерное искусство вместе с природой» (*Engineering with Nature*), программы, которой, по мнению многих проектировщиков, не суждено было увидеть свет. Национальное управление океанических и атмосферных исследований (NOAA) сделало «живые» береговые линии центральной темой своей программы по устойчивости берегов. Сотни проектов уже реализованы или находятся в стадии выполнения по всей стране, от укрепления береговой линии в штате Мэриленд до ликвидации подпорно-волноотбойной стены на побережье залива Пьюджет. Большинство мероприятий с небольшим объемом работ реализуются на уровне местного самоуправления, но становятся все более распространенными и проекты крупнее.

С ростом финансирования после принятия в 2009 г. «Закона о восстановлении экономики и реинвестировании» значительно увеличился объем некоторых проектов. В результате реализации проектов вдоль побережья Алабамы, Техаса и Луизианы теперь тянутся километры устричных рифов. Наилучший образец — остров Коффи у побережья Алабамы. Береговая линия острова отступила вглубь суши почти на 100 м. Примерно в 30 м от берега на протяжении 3 км вдоль острова организация «Охрана природы» разместила сетки с ракушками и шары из бетона. Риф сразу же стал блокировать волны, обеспечив возможность для восстановления маршей. В течение двух лет молодые устрицы заселили структуру (по 200 моллюсков на 1 м²), закрывая ее поверхность и привлекая рыбу, крабов и птиц.

Проекты восстановления, не связанные с побережьем Мексиканского залива и Юго-Востока США, могут оказаться сложными. В Калифорнии, например, это выполнить очень трудно. «На побережье залива Сан-Франциско, — рассказывает Майкл Бек, — утрачено более 90% естественных маршей, поэтому необходимо полностью восстанавливать окружающую среду в регионе, где очень много людей».

И все же было бы желание — и средства, — а способ найдется. Программа «Мероприятия по улучшению качества воды, предотвращению загрязнения воздуха и восстановлению естественной среды в районе залива Сан-Франциско» (*San Francisco Bay Clean Water, Pollution Prevention, and Habitat Restoration Measure*), принятая избирателями региона в 2016 г., предусматривает ежегодное поступление \$25 млн в течение 20 лет за счет специального налога на недвижимость. Эти \$500 млн будут потрачены на создание 40 тыс. га заболоченных участков — самое масштабное восстановление береговой линии в США — с помощью различных методов. Новейший метод — использование горизонтальных дамб вместо высоких узких насыпей

вдоль берега. Горизонтальные дамбы представляют собой широкие постепенно поднимающиеся от кромки воды и последовательно сменяющие друг друга приливные полосы, марши и луга, иногда уходящие вглубь суши на сотни метров. Уклон создают с помощью большого количества почвы (часто извлекаемой на строительных объектах), в которую высаживают рассаду. Такие горизонтальные дамбы могут быть ниже и на 40% дешевле традиционных дамб, поскольку за счет ширины обеспечивается поглощение разливающейся воды. Конфигурация также обеспечивает сообществом маршей достаточное пространство для отступления при подъеме уровня моря.

Еще один обнадеживающий признак — это законопроект о «живых» береговых линиях, который внес на рассмотрение Палаты представителей Конгресса США Фрэнк Паллоне (Frank Pallone), чей избирательный округ в штате Нью-Джерси был опустошен суперштормом «Сэнди». Законодательным актом предусмотрено выделение \$20 млн в год в виде грантов на работу с «живыми» береговыми линиями. В сенате вариант законопроекта представили Крис Мерфи (Chris Murphy) из Коннектикута и Камала Харрис (Kamala Harris) из Калифорнии. На момент выхода статьи были неясны перспективы указанных законодательных актов в конгрессе, но само существование таких законопроектов демонстрирует, что «живые» береговые линии получают все большее признание.

Комиссия по прибрежным ресурсам Северной Каролины недавно одобрила новую процедуру, благодаря которой получить разрешение на создание «живой» береговой линии будет так же просто, как и на строительство подпорной стены. В штате Мэриленд закон еще более строг: домовладелец должен доказать необходимость возведения подпорной стены вместо использования естественной береговой линии. Другие штаты, возможно, последуют этим примерам.

Наверное, наиболее многообещающее свидетельство — это заключенное в 2018 г. соглашение между организацией «Охрана природы», компаниями, занимающимися перестрахованием, и мексиканским штатом Кинтана-Роо о создании трастового фонда для защиты Мезоамериканского рифа вдоль побережья между Канкуном и Пуэрто-Морелос. Сделка предусматривает первый полис страхования, касающийся естественной экосистемы. Если риф будет поврежден штормом, из страхового фонда будут выделены средства на восстановление его естественных ресурсов.

Для того чтобы «живые» береговые линии стали важной частью любого долгосрочного плана по защите берегов, правительству, представителям страховой индустрии и тем, кто принимает решения по вопросам развития, необходимо осуществлять меры по оздоровлению и созданию таких

экосистем до того, как ударят штормы. После воздействия стихии необходимо финансировать следующие этапы проектов за счет расходов на восстановление. Для этого требуются хорошая научная база и точные экономические расчеты (на данный момент эти условия выполнены), а также убедительные доказательства в виде демонстрационных проектов, количество которых растет.

Первым значимым примером финансирования природной инфраструктуры после воздействия стихии могли бы стать решения, принимаемые FEMA и другими агентствами, которые собираются израсходовать более \$100 млрд из фондов возмещения убытков после недавних ураганов. Хотя традиционно для смягчения последствий бедствий FEMA вкладывало средства в основном в выкуп поврежденных домов на побережье или их строительство, агентство скорректировало свою новую стратегию анализа выгод и издержек и предпочло инвестиции в природную инфраструктуру. Майкл Бек надеется, что такая смена акцентов приведет к реализации финансируемых из федерального бюджета проектов небывалых масштабов во Флориде, Пуэрто-Рико и на побережье Мексиканского залива. Возможно, вскоре начнется реализация и других крупномасштабных проектов по всему миру, поскольку правительства, специалисты по управлению рисками стихийных бедствий, бизнес, банки и страховщики стремятся добиться снижения подверженности риску с наименьшими затратами. Такие изменения будут означать, что общество осознало: природа — это не роскошь. Это будущее. ■

Перевод: С.М. Левензон

Статья подготовлена в сотрудничестве с некоммерческой организацией новостных расследований Food & Environment Reporting Network («Сеть распространения информации о продовольствии и окружающей среде»).

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Кэри Д. Архитекторы болот // ВМН, № 3, 2014.
- Marshes with and without Sills Protect Estuarine Shorelines from Erosion Better Than Bulkheads during a Category 1 Hurricane. Rachel K. Gittman et al. in *Ocean & Coastal Management*, Vol. 102, Part A, pages 94–102; December 2014.
- *Managing Coasts with Natural Solutions: Guidelines for Measuring and Valuing the Coastal Protection Services of Mangroves and Coral Reefs*. Edited by M.W. Beck and G.-M. Lange. World Bank, January 2016.
- Академия «живых» береговых линий: www.livingshoreline-sacademy.org



КЛИМАТ

УСИЛИТЕЛЬ НЕПОГОДЫ

Необычные волны струйного течения предвещают
аномальную жару и потопы в будущем

Майкл Манн

Неистовые пожары возле Делты,
штат Калифорния, в сентябре 2018 г.,
поддерживаемые непрекращающимися
жарой и засухой

ОБ АВТОРЕ

Майкл Манн (Michael Mann) — профессор, руководитель Центра наук о Земле Университета штата Пенсильвания. Он написал, в том числе в соавторстве, четыре книги: «Мрачный прогноз» (*Dire Predictions*), «Хоккейная клюшка» и климатические войны» (*The Hockey Stick and the Climate Wars*), «Эффект сумасшедшего дома» (*The Madhouse Effect*) и «Истерика, которая спасла мир» (*The Tantrum That Saved the World*).



Рассмотрим следующие летние аномалии и чрезвычайные ситуации.

В 2003 г. самые жестокие вспышки жары в истории Европы унесли жизни более 30 тыс. человек.

В 2010 г. пожары в России и наводнения в Пакистане нанесли невиданные разрушения и стали причиной гибели людей. В 2011 г. в результате страшной жары и засухи в США фермеры Оклахомы потеряли четверть поголовья своего скота. В истории Канады не бывало таких страшных бедствий, как пожары 2016 г. в провинции Альберта. Печально известно в США лето 2018 г, когда температура воздуха целыми днями зашкаливала за 100 градусов по Фаренгейту (37,8° C) в пустыне на юго-западе страны, ливневые осадки и наводнения обрушились на среднеатлантические штаты, а Калифорнию потряс сезон пожаров. Безумная жара, наводнения и пожары также неистовствовали по всем Европе и Азии.

Случайно ли стечение обстоятельств, указывающее, что самые разрушительные типы летней погоды наблюдались в последние десятилетия? Я и мои коллеги думаем, что нет. Все эти явления имеют одну общую потрясающую черту: весьма необычный характер струйного течения. Высотное струйное течение — узкая зона сильного ветра, дующего с запада на восток в Северном полушарии, в основном вдоль границы США и Канады, далее через Атлантический океан, Европу и Азию. Эта зона иногда совершенно выпрямлена, но может совершать глубокие изгибы в форме S в горизонтальном положении. Обычно ее изгибы простираются в северном направлении от Тихого океана на запад Канады, затем поворачивают на юг через Средний Запад США, а потом возвращаются в направлении провинции Новая Шотландия. Как правило, эти переходы с запада на восток над США длятся несколько дней, принося теплый воздух на север и прохладный на юг и создавая области выпадения дождевых или снежных осадков, особенно на перегибах волн. Это струйное течение управляет нашей ежедневной погодой.

Как было мной замечено, во время чрезвычайных ситуаций струйное течение ведет себя необычно. Изгибы заходят исключительно далеко на север и юг, и они задерживаются — не продвигаются на восток. Чем больше размах этих изгибов, тем суровее становится погода у северных гребней и южных подошв волн. И когда волны останавливаются, как это случилось над США летом 2018 г., в этих районах день за днем идут проливные дожди или печет солнце. Происходят также катастрофические наводнения, засухи, аномальная жара и пожары.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Когда очертания струйного течения приобретают сильную извитость, то летом возможны проливные дожди или страшная жара. А если струи застопориваются, плохая погода может продолжаться многие дни.
- Математические методы квантовой механики помогают понять, как резонанс в атмосфере может усиливать изгибы, ухудшая суровую погоду еще больше.
- Примерно к 2050 г. аэрозольное загрязнение воздуха угольными электростанциями замедлит возрастающую серьезность общего потепления, но по мере того как на заводах будут устанавливаться скрубберы, интенсивность солнечного излучения снова будет расти.



В результате сильных наводнений в 2010 г., вызванных атмосферным явлением, называемым квазирезонансной амплификацией, под водой оказался Хайрпур-Намхан-Шах (Пакистан)

Мы с коллегами установили, что эти сильные искривления застывших волновых движений становятся повседневными по причине глобального потепления, подпитывающего погодные катаклизмы. Однако мы отмечаем в прогнозах, что повышающаяся резкость смены погоды может выровняться в следующие несколько десятилетий. Как ни странно, это можно охарактеризовать словом «хорошо»: плохие периоды по-прежнему будут случаться, но они по крайней мере не станут еще хуже. Мы также прогнозируем, что катаклизмы станут ужесточаться в значительной мере начиная приблизительно с 2050 г., особенно летом. Угроза здоровью и безопасности людей повысится, ущерб от стихийных бедствий приобретет широкие масштабы, а сельскохозяйственные культуры, необходимые для питания растущего населения, будут теряться.

Откуда мы это знаем? Математическое описание волн и квантовая механика — наши помощники. На самом деле математическая характеристика поведения электронов в мельчайшем масштабе помогает нам описать атмосферные явления в глобальном распространении. У нас появились свидетельства, что рост опасных погодных условий, их будущее выравнивание и последующее

наращивание вызваны непонятным взаимодействием концентрации парниковых газов, образованных при сжигании ископаемого топлива, и промышленным загрязнением серой. И эта взаимная увязка поднимает вопрос, удержит ли сокращение эмиссии струйное течение от порождения хаоса.

Волны Россби приносят плохую погоду

Струйное течение образуется там, где потоки теплого воздуха субтропиков отклоняются к северу и встречаются с холодным воздухом приполярных областей, попросту говоря, где соединяются США и Канада. Ветры струйного течения дуют на высоте около 10 км у границы между тропосферой (самый нижний слой атмосферы, где проявляется погода) и стратосферой (верхний слой атмосферы, где летают самолеты).

Чем больше разница температур в пограничной зоне потоков при встрече субтропического и полярного воздуха, тем сильнее ветер струйного течения. В летний период разница температур меньше, чем зимой, поэтому струйное течение тише. Когда оно ослабевает, более вероятен широкий размах изгибов, уходящих на север и юг.

Но почему изгибы образуются именно в этих местах? На струйное течение воздействует ряд

Аномальная погода застаивается на месте

Струйное течение управляет погодой в Северном полушарии. На его изгибах могут формироваться центры высокого давления, приносящие сильные ливни или жару (на глобусах). Очень глубокие извилины могут зависнуть на месте, поддерживая погодные аномалии много дней, особенно в летний период. Любопытно отметить, что физические процессы планетарного масштаба сопоставимы с таковыми на атомном уровне с позиции квантовой механики (на прямоугольной диаграмме).



Циркуляция струйного течения вокруг Земли

Струйное течение рождается на широтах примерно между 30-й и 60-й параллелями, между основными ячейками атмосферной циркуляции (вверху). В Северном полушарии полярное струйное течение несется с запада на восток вокруг земного шара, иногда почти по прямой линии, а иногда со слабыми изгибами (внизу). Метеоусловия следуют за ним.

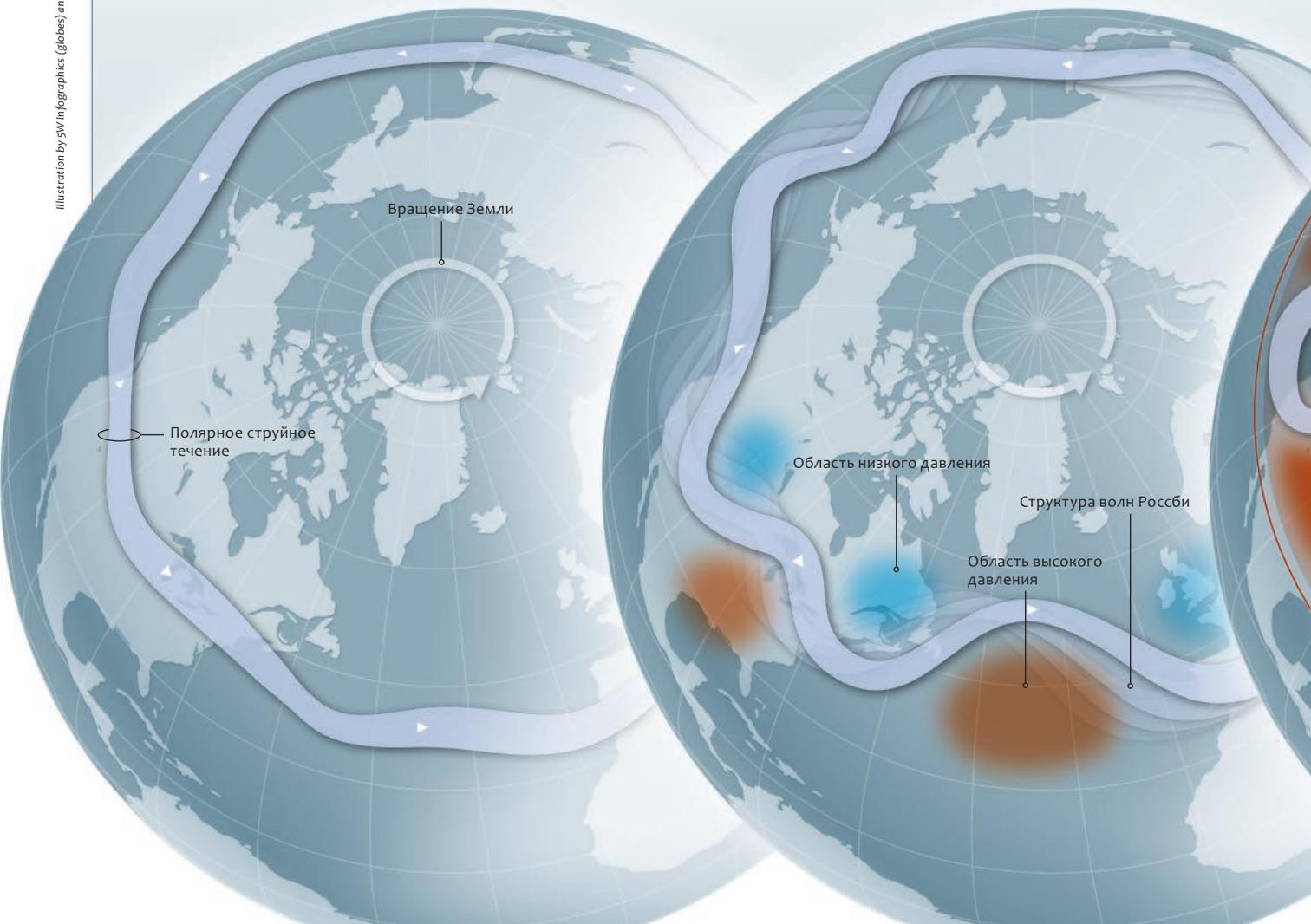
Волновод в небе

Атмосферный волновод, захватывающий волны Россби, в математическом представлении схож с квантовым волноводом, который улавливает электрон. С позиций классической физики электрон, окруженный бесконечно высокими стенами (которые представляют собой высокоэнергетичный барьер), действует подобно частичке, прыгающей туда-обратно **A**. Если стены обладают слабой энергией, электрон может вырваться наружу. Но с точки зрения квантовой механики электрон действует как волна, сдерживаемая внутри волновода, и если тот слаб (небольшая энергия), то велика вероятность, что электрон окажется за пределами стен **B**. Однако если волновод обладает высокой энергией, вероятность выхода электрона через стены гораздо меньше, подобным образом волны Россби связаны с чрезвычайно изогнутым струйным течением, застрявшим внутри атмосферного волновода и посылающим на Землю наказание в виде затяжной жары или постоянных ливней.

Рост центров давления

В летний период резко выраженные изгибы струйного течения создают области низкого давления (L), которые вызывают прохладную, сырую погоду и области высокого давления (H), обеспечивающие жаркие засушливые условия. Иногда струйное течение приобретает повторяющуюся волнообразную структуру (на изображении), следуя форме волн Россби, возникающих в атмосфере под влиянием вращения Земли. Развитие волн и погодных условий идет в направлении с запада на восток.

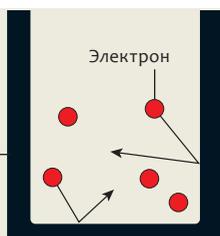
Illustration by 3W Infographics (globes) and Jen Christiansen (waveguides)



А Классическая физика

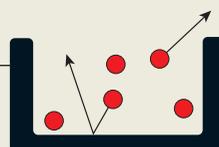
Бесконечно высокие стены представляют собой высокоэнергетичный барьер.

Электроны — частицы с высокой энергией, которые не могут убежать.



Ограничивающие стены представляют собой барьер с небольшой энергией.

Электроны — частицы со средней энергией, которые могут убежать.



В Квантовая физика

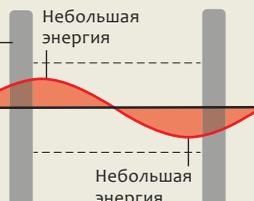
Бесконечные стены представляют собой высокоэнергетичный барьер, который ведет себя как сильный волновод.

Электроны — волны с низкой степенью вероятности прохода через стены.



Ограничивающие стены представляют собой барьер с небольшой энергией, который действует как слабый волновод.

Электроны — волны с высокой степенью вероятности оказаться за пределами стен.

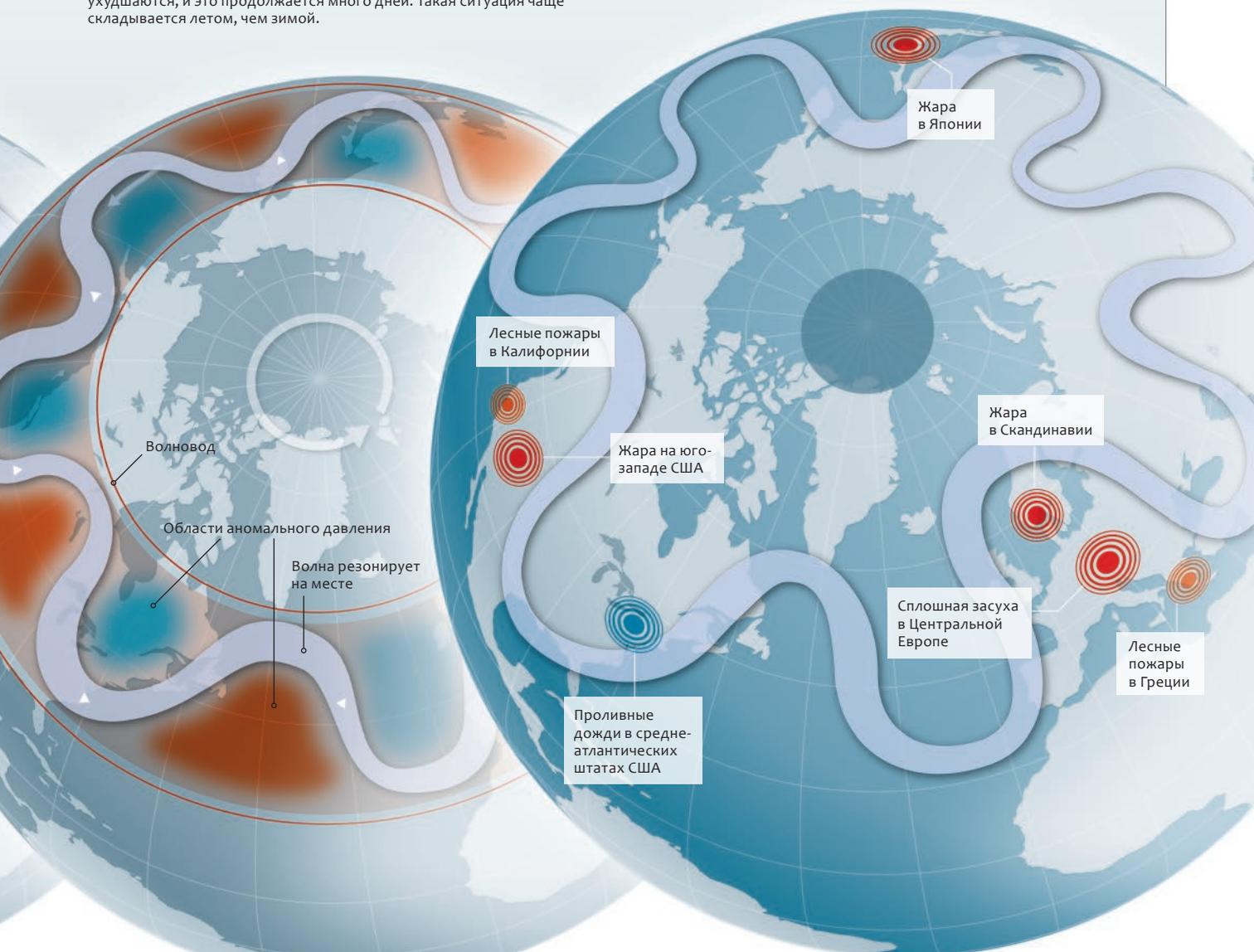


Ураганы откликаются на резонанс

Большие волны Россби и изгибы струйного течения, которые их сопровождают, могут завестись на месте, образуя стоячую волну. Атмосфера может сработать как волновод (красные линии), помогающий изгибам резонировать и усиливаться, продвигаясь все далее на север и юг (на изображении). Местные погодные условия ухудшаются, и это продолжается много дней. Такая ситуация чаще складывается летом, чем зимой.

День стихийных бедствий

Резонирующее струйное течение, застопорившееся в конце июля и начале августа 2018 г., вызвало или усилило экстремальные погодные условия по всему миру. 22 июля жара и засуха охватили несколько регионов и усилили лесные пожары, в то время как сильные наводнения произошли в других районах.





Высохшие цветы подсолнечника (1) и зачихшие семена (2), найденные вблизи Гольсена (Германия), — плоды продолжительной засухи в 2018 г.

крупных волн, проходящих сквозь атмосферу, образованных под действием естественного вращения Земли в текучей среде, в данном случае в воздухе. Это волны Россби, названные в честь американского метеоролога шведского происхождения Карла Густава Россби (Carl-Gustaf Rossby), который в 1930-х гг. впервые объяснил физические законы крупномасштабных атмосферных движений. Эти волны встречаются также в океанах.

Волны Россби в атмосфере распространяются на сотни километров и движутся с запада на восток в Северном полушарии. Когда разница температур воздушных масс уменьшается в летнее время, волны Россби имеют тенденцию к большему изгибу и более медленному продвижению в Северной Америке с запада на восток. Струйное течение идет вслед, повторяя форму этих волн.

Другие виды волн также распространяются в атмосфере и океане. Это, например, гравитационные волны, исходящие из временных возмущений, возникающих в атмосфере между силой тяжести, устремляющейся вниз, и выталкивающей силой, направленной вверх; их можно сравнить с потоком воздуха, переваливающим через горный хребет. Волны Кельвина наблюдаются в Тихом океане в узком коридоре, охватывающем с двух сторон экватор. Как и следовало ожидать, они перемещаются с запада на восток, периодически подогревая и охлаждая поверхностные воды, в чем и заключается ключевой «ингредиент» климатического явления Эль-Ниньо (Южной осцилляции).

Извивы струйного течения формируют погодные системы на местности, которые продвигаются вслед тем же путем в восточном направлении. Мы наблюдаем их на синоптических картах как области высокого и низкого давления. Система высокого давления, укрывшаяся внутри северного изгиба, или барического гребня, вращается по часовой стрелке и летом приносит сухую жаркую погоду. Система низкого давления, спрятавшаяся внутри

южного изгиба, или барической ложбины, вращается против часовой стрелки, приводя к сырой прохладной погоде. При достаточно слабом струйном течении S-образная волна Россби, которую оно сопровождает, может застрять на месте без продвижения на восток, то есть остаться в режиме стоячей волны. Обе погодные системы вращаются на месте, настойчиво припекая Землю или обрушивая на нее неослабевающие ливни и наводнения, как это случилось при нашествии урагана «Харви» в Техасе и урагана «Флоренс» в восточной части центральных районов США.

Резонанс ухудшает положение

Настоящие погодные катаклизмы обычно происходят, когда волны Россби, а следовательно и струйного течения, значительно увеличиваются. Чем выше поднимаются гребни и ниже падают ложбины, тем больше барический максимум и барическая депрессия. В этих условиях стоячей волны область высокого давления становится застойной (иногда это называется режимом блокировки). Именно такое положение вызвало аномальную жару в июле 2018 г. на юго-западе США и одновременные наводнения в среднеатлантических штатах. Другим классическим примером служит гребень высокого давления, установившийся над Россией в июле 2010 г., с которым связаны рекордная жара, засуха и пожары, а также раскинувшаяся над Пакистаном глубокая депрессия, к которой приурочены небывалые наводнения.

Амплитуда обычных волн Россби ограничена энергией, которую они излучают при отклонении к северу и югу и движении на восток. Хотя надо отметить, что в определенных условиях атмосфера может играть роль волновода. Представим линию, протянувшуюся с запада на восток через центральную часть Канады, и другую — через южную часть США. Изогнутая волна Россби остается зажатой этими «стенами» при небольшой

потере энергии. Такое ограничение блокирует изогнутый струйный поток и сильные системы высокого и низкого давления. Коаксиальный кабель, идущий от вашей кабельной компании к вашему телевизору, служит примером волновода. Электромагнитные волны, передающие телевизионный сигнал, в значительной степени ограничены цилиндрической стенкой кабеля, и энергии сигнала теряется мало. Спасибо физическим свойствам волноводов за четкие изображения, которые вам нравятся.

Когда волны застревают на месте и становятся стоячими, то при определенных обстоятельствах изгибы могут быстро увеличиваться по амплитуде — что в физике определяется как резонанс. Когда это происходит с волнами Россби, чаще летом, это называется квазирезонансной амплификацией (*QRA*). Несколько лет назад Владимир Петухов с коллегами из Потсдамского института изучения климатических изменений показал, что условия, поддерживающие *QRA*, зависят от формы струйного течения. Оказывается, изменение климата может повлиять на очертания струйного течения и, следовательно, на *QRA* и частоту летних погодных аномалий.

Чтобы понять, как происходит это соединение, нам нужно обратиться к той же математике, которая была разработана в начале XX в., чтобы решить определенные проблемы в квантовой механике. Эта связь для меня особенно приятна. Я начинал свою карьеру в области теоретической физики, прежде чем заняться научными исследованиями атмосферы, поэтому меня обнадеживает то, что написанные десять лет назад учебники по квантовой механике, по которым я учился, все еще полезны в моей работе.

Квантовая связь

Понимание того, как математически сходно поведение атмосферной волны и электрона, поможет выявить главную причину усиления засух и наводнений.

Согласно классическим физическим законам, электрон может оказаться в ловушке, когда он окружен высокой потенциальной энергией. Представьте себе, что вы смотрите сбоку в коробку с бесконечно высокими стенами. Электрон не может пройти сквозь стены, так как их энергия бесконечно высока и ее нельзя преодолеть. Электрон отскакивает назад, подпрыгивает вперед, слева направо, двигаясь по прямой.

С точки зрения квантовой механики картина выглядит по-другому. У электрона больше нет определенного положения. Вместо этого вероятность обнаружения электрона определяется знаменитым уравнением Шредингера — волновым уравнением. Движение электрона, или, точнее, вероятность, где электрон будет скорее всего найден, описывается

синусоидальной кривой: S , лежащей на боку. Это вам что-то напоминает? Электрон отчасти действует как частица, а отчасти — как волна.

Становится интересным, когда «стены» потенциальной энергии не бесконечны в высоту, а, наоборот, имеют предел. В этом случае электрон имеет малую, но вероятность действительно пройти сквозь стену, и он может сделать это на всем пути, если стена достаточно тонкая. Это как если бы вы ударили теннисным мячом о бетонную стену, и он проломил бы ход через нее и вышел наружу с другой стороны. Такая же вероятность касается и противоположной стены. Электрон в значительной степени ограничен стенами коробка, но с небольшой «утечкой» через границы. Добро пожаловать в своеобразный мир квантовой механики.

Рассматривать через эту ограничивающую коробку все равно, что смотреть внутрь слегка дающего протечки трехмерного волновода, такого как, например, коаксиальный кабель. Математический самородок, который позволяет нам решать уравнения, описывающие эти объекты, представили в 1926 г. трое ученых — Грегор Вентцель (Gregor Wentzel), Хендрик Крамерс (Hendrik Kramers) и Леон Бриллюэн (Léon Brillouin), соответственно, он известен как приближение (метод) ВКБ. Метод ВКБ используется в квантовой механике для решения множества волновых уравнений и помогает в разработке таких продуктов, как туннельный диод в вашем смартфоне.

В начале 80-х гг. XX в. Дэвид Кэроли (David Karoly), сейчас работающий в австралийской Организации по научным и промышленным исследованиям стран Содружества, и Брайан Хоскинс (Brian Hoskins) из Редингского университета доказали, что атмосфера может служить волноводом для застывших, или стоячих, волн Россби, имеющих определенную длину в коротком диапазоне (примерно соответствует ширине континентальной части США, или составляет от шести до восьми полных длин волн, распространяющихся по всему Северному полушарию).

Стоячая волна Россби попадает в ловушку внутри волновода только при минимальной утечке энергии через северную и южную границы, то есть ведет себя так же, как электрон. В этом положении амплитуда волны может расти по причине возникновения *QRA*. Застряв на месте, новые огромные волны создают условия погодных катаклизмов внутри своих перегибов, что может длиться днями. Метод ВКБ, важный для решения волноводных задач в квантовой механике, также помогает решить проблему волноводов Россби.

Изменяющийся волнами климат

Понимая это, мы можем теперь видеть, как изменение климата неблагоприятно влияет на стоячие волны, которые выдают устойчивые погодные

аномалии. Несколько лет назад Петухов и его потсдамские коллеги, исходя из работы Кэрли и Хоскинса, отмечали, что волноводные условия для стоячих волн Россби возникают главным образом летом. Часто летом струйное течение — это не все время дующий с запада на восток сильный ветер. Он периодически изменяется, зажатым между двумя коридорами, расположенными к северу и югу от основного пути вдоль границы США и Канады.

Используя метод ВКБ, группа Петухова показала, что именно в этих «двухпиковых» условиях струйного течения атмосфера может вести себя как волновод для коротких волн Россби. Амплитуда этих волн обычно мала: изгибы простираются не очень далеко на север или юг. Но если первоначальный изгиб возникает, когда воздушные массы, движущиеся с запада на восток, ударяют в Скалистые горы или Альпы, или сталкиваются с резким перепадом температуры на границе суши и океана, волны Россби могут легко возрасти благодаря действию механизма *QRA*.

Погодные условия, благоприятные для *QRA*, изменяются от года к году. Они в значительной степени зависят от характера изменения температуры в нижних слоях атмосферы с севера на юг, что хорошо видно на моделях. В 2017 г. я и мои коллеги показали, что в последние десятилетия наблюдается тенденция к созданию условий, благоприятствующих *QRA*. Климатические модели показывают, что эта тенденция обусловлена постепенным ростом во времени концентрации парниковых газов. Природные факторы, такие как колебания солнечного излучения и извержения вулканов, а также разные человеческие факторы, особенно такие, как загрязнение атмосферы диоксидом серы, также сыграли свою роль. Модели, называемые *CMIP5*, появились в результате моделирования, проведенного более чем 50 группами по всему миру для самого последнего доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК).

Температурные данные метеостанций и полученные на моделях показывают, что изменение климата вызывает нагрев Арктики быстрее, чем остальной части Северного полушария, и это явление получило название Арктической амплификации. Меньшая разница между температурами средних и полярных широт способствует более медленному струйному течению в целом, что благоприятствует более устойчивым погодным условиям и соответствует «двухпиковому» течению и *QRA*.

Эта становящаяся все более выраженной тенденция помогает объяснить поток продолжительных летних погодных аномалий, наблюдаемых в Северном полушарии за последние два десятилетия. Недавно ученые обнаружили, что условия

QRA сопряжены с периодом необычайно жаркой погоды в Европе в 2003 г., с пожарами в России в 2010 г. и связанными с ними наводнениями в Пакистане, засухой, охватившей Оклахому и другие районы США в 2011 г., а также пожарами в Калифорнии в 2015 г. и в канадской провинции Альберта в 2016 г. Сегодня мы можем добавить в этот список небывалые пожары 2018 г. в Калифорнии. Вызванное деятельностью человека изменение климата повышает вероятность экстраординарного поведения погоды примерно на 50% в течение нескольких последних десятилетий.

Застой

Похоже, что погодные катаклизмы должны только усиливаться. И некоторые основные факторы говорят о том, что это случится. Например, более теплая атмосфера содержит больше влаги, что ведет к более сильным ливням и наводнениям. Потеплевшая планета сулит более частые, продолжительные и интенсивные приливы жары. А как обстоит дело со стоячими волнами струйного течения и *QRA*?

Как заметили великий физик Нильс Бор и легенда бейсбола Йоги Берра (Yogi Berra), прогнозы сложны, «особенно в отношении будущего». В статье, опубликованной совместно с моими коллегами в октябрьском номере *Science Advances* 2018 г., я проанализировал, как *QRA* может измениться в результате прогнозируемых будущих климатических изменений. Мы действительно ожидали, что тенденция к повышению не угаснет, но то, что мы нашли, было совсем другое.

В экспериментальных исследованиях, проведенных для МГЭИК на моделях *CMIP5*, оцениваются различные сценарии будущего развития начиная с усиленного немедленного сокращения выбросов углекислого газа до следования человечества по выбранному пути наращивания выбросов CO_2 . Согласно так называемому инерционному бизнес-сценарию, как было выявлено, тенденция благоприятствования *QRA* стабилизируется примерно до 2050 г., а затем ускоряется во второй половине нашего столетия.

Мы обнаружили, что причина заключается в другом важном, но иногда не учитываемом показателе изменения климата, вызванного человеком: наличие загрязнителей атмосферы, таких как диоксид серы, образующихся в результате сжигания угля и других видов промышленной деятельности. Эти загрязнители образуют частицы, или аэрозоли, которые переносятся в атмосфере и отражают солнечный свет в космос, охлаждая земную поверхность.

Аэрозольное загрязнение стало причиной кислотных дождей, пролившихся в период с 50-х по 70-е гг. XX в. на северо-востоке США. «Закон о чистом воздухе» (*Clean Air Act*) гласил, чтобы

промышленные предприятия устанавливали скрубберы в дымовые трубы для удаления диоксида серы из выбросов. Исполнение закона помогло спасти леса, озера и реки, однако в атмосфере осталось меньше аэрозолей, чтобы отражать солнечный свет и таким образом противодействовать общему потеплению, вызванному растущей концентрацией углекислого газа, одной из причин ускорения глобального потепления с 1970-х гг.

Большая часть остального мира (наиболее важное место в ней занимает Китай, на который сегодня приходится почти половина всего сжигаемого угля) все еще применяет старые способы промышленного производства. Рассмотренный МГЭИК инерционный сценарий предполагает, что такие страны, как Китай, будут продолжать сжигать уголь, наращивая эмиссию двуокси углерода, и к концу XXI в. доиндустриальный уровень CO_2 будет более чем утроен. Однако этот сценарий также допускает, что в данных отраслях будут установлены скрубберы в течение следующих нескольких десятилетий.

Надо отметить, что такой ход приведет к резкому сокращению аэрозолей в период между сегодня и серединой столетия, а следовательно, к гораздо более сильному потеплению. Последствия окажутся особенно серьезными летом в средних широтах при максимуме солнечного света, поскольку большая часть его больше не будет отражена. На некоторых моделях значения летнего потепления в средних широтах столь велики, что превышают показатели потепления Арктики. Арктическая амплификация снижается или даже останавливается. Это будет означать отсутствие увеличения или даже уменьшение QRA , а также дальнейшее ухудшение режима струйного течения на фоне усугубления экстремальных летних условий.

Судьба в наших руках

Такое видение будущего кажется выгодным деловым предложением. Но на самом деле это фаустовская сделка. Недолгий результат смягчающего климата действия достигается за счет больших затрат в течение длительного времени. К середине столетия аэрозоли в основном исчезнут, поэтому с этого момента рост концентрации парниковых газов продолжит повышать температуру. И в очередной раз этот подъем пойдет быстрее в полярной области. Арктическая амплификация вновь набирает силу, и связанные с QRA погодные характеристики, такие как, например, замедленные, интенсивные, жаркие, сухие и влажные паттерны, снова начинают превалировать. К концу столетия все скверные погодные условия возрастут примерно на 50% по отношению к нынешнему состоянию. Изменения будут наиболее заметными летом, в средних широтах, что особенно тревожит, потому что именно там живет большинство населения

и растет большое количество сельскохозяйственных культур, причем многие из них плохо переносят сильную жару.

Есть ли какой-либо выход? Если сейчас мир начнет быстро выходить из принятого плана инерционного развития и значительно снизит выбросы углекислого газа, мы сможем избежать катастрофических $2^\circ C$ ($3,6^\circ F$) потепления планеты и, вероятнее всего, предотвратим любое дополнительное увеличение QRA . Самый безопасный (и наиболее рентабельный) путь успешного развития состоит в немедленном сокращении сжигания ископаемого топлива и ограничении других видов деятельности человека, которые ведут к росту концентрации парниковых газов.

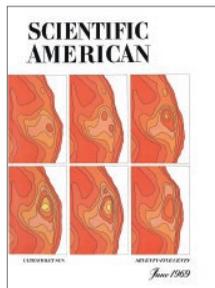
Важно отметить, что мир должен принимать решения в условиях неопределенности. На некоторых моделях отмечено гораздо большее (более чем в три раза) увеличение явлений QRA , тогда как на других показано их действительное уменьшение. Разброс данных возникает в значительной степени из-за различных подходов климатического моделирования к отображению аэрозолей. Совпадут ли прогнозы? Пока мы не знаем. Можно сказать, что самые разумные дальнейшие действия в условиях неопределенности и огромного потенциального риска в случае подтверждения наихудшего варианта развития заключаются в решительном сокращении вредных выбросов.

Без сомнения, было бы важным прояснить моменты неопределенности. В этом направлении, по крайней мере частично, необходимо лучше разобраться в физических процессах, в данном случае в свойствах аэрозолей и рассеяния ими солнечного света — электромагнитных волн, исходящих от Солнца. И это снова возвращает нас к изучению физических свойств волн. Мы прошли полный цикл. ■

Перевод: В.И. Сидорова

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Мастерс Д. Струйное течение становится фатальным // ВМН, № 2, 2015.
- Influence of Anthropogenic Climate Change on Planetary Wave Resonance and Extreme Weather Events. Michael E. Mann et al. in Scientific Reports, Vol. 7, Article No. 45242; March 27, 2017.
- The Influence of Arctic Amplification on Mid-latitude Summer Circulation. D. Coumou et al. in Nature Communications, Vol. 9, Article No. 2959; August 20, 2018.
- Projected Changes in Persistent Extreme Summer Weather Events: The Role of Quasi-Resonant Amplification. Michael E. Mann et al. in Science Advances, Vol. 4, No. 10, Article No. eaat3272; October 2018.

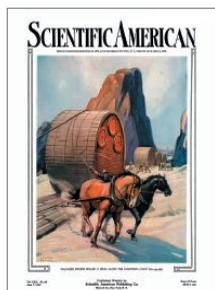


ИЮНЬ 1969

Живая вода для сердца. Исследования, проведенные в прошлом десятилетии, дают основания полагать, что смертность от ишемической болезни сердца обратным образом коррелирует с жесткостью воды местного водоснабжения: чем она жестче, тем ниже заболева-

емость. Недавняя публикация в *The New England Journal of Medicine* свидетельствует, что случаи, дающие превышение уровня смертности от ишемической болезни в районах с мягкой водой, — почти всегда внезапная смерть вне стен больницы. Ученые Школы гигиены Торонтского университета изучили свидетельства о смерти 55 тыс. человек из провинции Онтарио в 1967 г. и связали смертность с качеством местной воды. Причина этой связи все еще остается предметом дискуссии; последние теории предполагают влияние магния и кальция.

Вакцина от краснухи. Вакцины, которые вырабатывают иммунитет от краснухи («немецкой кори») более чем у 95% испытуемых, вероятно, получат лицензии в США в течение уже ближайших нескольких недель. Широкая иммунизация этими вакцинами, возможно, предотвратит новую волну заболевания, которой ожидают в начале 1970-х гг., вроде той, что захлестнула США в 1964 г. и стала причиной смерти по крайней мере 8 тыс. эмбрионов и вызвала у 15–20 тыс. младенцев глухоту, заболевания сердца, катаракту, глаукому, задержку психомоторного развития и заболевания крови.



ИЮНЬ 1919

Трансатлантический перелет. Переверните историю всех искусств и наук, и вы не найдете ничего, что вызвало бы столь громкую сенсацию и всеобщее воодушевление, как искусство летать — это удивительное дитя XX в. Бомбардировщик *Vickers Vimy*, построенный, что-

бы бомбить Берлин, пронес капитана Олкока (John Alcock) и штурмана Брауна (Arthur Brown) над Атлантикой от Ньюфаундленда до побережья Ирландии за один перелет продолжительностью 16,5 часов. Так что эти отважные парни, пообедав в Америке, позавтракали уже в Европе.

Очень медленный прогресс. Геологическое общество Лондона решило допускать женщин в свои ряды. Этот вопрос ранее уже трижды рассматривался, и всякий раз результат был отрицательным.



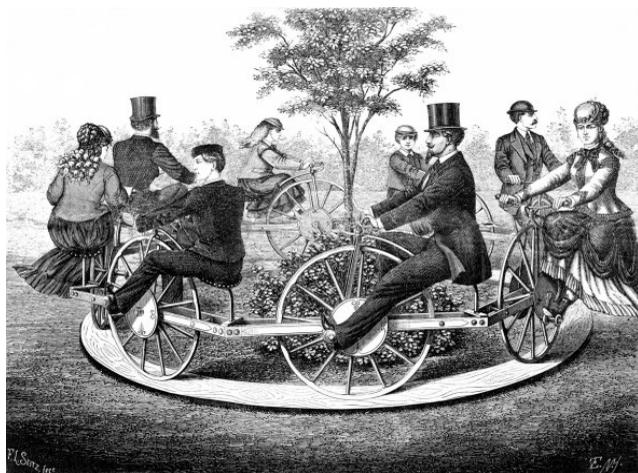
ИЮНЬ 1869

На велосипеде по кругу. Велосипед, приспособленный для использования лицами любого пола и возраста, имеющими навыки езды и нет, на котором еще большее удовольствие доставляет то, что едешь вместе с другими, показан на нашей гравюре. Принципы работы и де-

тали этого изобретения изображены нашим художником. Машина сконструирована для использования на частных и общественных развлекательных площадках.

Магнитная буря. Вечером 15 апреля магнитная буря невиданной силы распространилась на всю северную часть страны, и это настолько серьезно повлияло на работу телеграфных сетей, что некоторые из них можно было использовать, только если отключить их от батарей и работать на электричестве, вызванном северным сиянием. Огромное возмущение в магнитосфере Земли воздействовало на телеграфные линии между Нью-Йорком и Бостоном: в течение нескольких часов это направление полностью обеспечивалось энергией из столь необычного источника.

Бумага для носа. Как утверждает *Boston Journal of Chemistry*, было замечено, что японские сановники, недавно посетившие нашу страну, вместо носовых платков использовали листки бумаги, которые они носят в кармане. Один и тот же листок никогда не использовался повторно, а сразу же выбрасывался. Мы полагаем, что во время повальной простуды вся Японская империя покрыта бумажными салфетками. Бумага эта особого свойства — мягкая, тонкая и очень прочная. ■



Предшественник велотренажера (сиденье для дам расположено сбоку), 1869 г.

Senior Vice President and Editor in Chief:	Mariette DiChristina	Contributing editors:	David Biello, W. Wayt Gibbs, Ferris Jabr, Anna Kuchment, Robin Lloyd, George Musser, Christie Nicholson, John Rennie
Executive Editor:	Fred Guterl	Art Contributors:	Edward Bell, Bryan Christie, Lawrence R. Gendron, Nick Higgins
Design Director:	Michael Mruk	Art director:	Jason Mischka
Managing Editor:	Ricki L. Rusting	Senior Graphics Editor:	Jen Christiansen
Digital Content Manager:	Curtis Brainard	President:	Dean Sanderson
News Editor:	Dean Visser	Executive Vice President:	Michael Florek
Opinion Editor:	Michael D. Lemonick	Executive Vice President,	
Senior Editors:	Eliene Augenbraun, Christine Gorman, Steve Mirsky, Clara Moskowitz, Debbie Ponchner, Claudia Wallis, Kate Wong,	Global Advertising and Sponsorship:	Jack Laschever
Associate Editors:	Sunya Bhutta, Lee Billings, Andrea Gawrylewsk, Larry Greenemeier, Dina Fine Maron, Annie Sneed, Amber Williams	Publisher and Vice President:	Jeremy A. Abbate

© 2019 by Scientific American, Inc.

В мире науки

Оформить подписку на журнал «В мире науки» можно:

в почтовых отделениях по каталогам:
«Роспечать», подписной индекс:
 81736 — для физических лиц,
 19559 — для юридических лиц;
«Почта России», подписной индекс:
 16575 — для физических лиц,
 11406 — для юридических лиц;
«Пресса России», подписной индекс: 45724,
www.akc.ru

по РФ и странам СНГ:
 ООО «Урал-Пресс»,
www.ural-press.ru
 СНГ, страны Балтии и далее зарубежье:
 ЗАО «МК-Периодика»,
www.periodicals.ru
 РФ, СНГ, Латвия:
 ООО «Агентство "Книга-Сервис"»,
www.akc.ru

Читайте в следующем номере

Корни человеческой агрессии

Начались эксперименты с участием людей и животных, призванные выяснить, как агрессивное поведение формируется в мозге.

Ночное зрение

Благодаря особому строению зрительной системы многие животные не только отлично видят в темноте, но и способны различать цвета в почти полном мраке.

СПЕЦИАЛЬНЫЙ РЕПОРТАЖ: БУДУЩЕЕ МЕДИЦИНЫ — 2019

Репродуктивное здоровье женщин

Если при обсуждении репродуктивного здоровья преобладает политическое желание контролировать эту сферу, то пробелы в медицинских исследованиях остаются незамеченными.

Искусственное воображение

Как можно обучить машину таким традиционно считавшимся присущими исключительно людям свойствам, как креативность и здравый смысл.

Апгрейд реакторов

Улучшение топлива способно повысить безопасность и эффективность атомных электростанций.



ПОЧЕМУ МЫ ВЕРИМ В ТЕОРИЮ ЗАГОВОРА

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Ежемесячный
научно-информационный
журнал

www.sci-ru.org

5/6 2019

12+

ВНУТРЕННЯЯ ЖИЗНЬ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

В недрах самых
плотных объектов
во Вселенной

ПЛЮС

СВЕТ МОРЯ

Академик Иосиф Гительзон
об экологической биофизике

НЕВЫЯВЛЕННОЕ ЗАБОЛЕВАНИЕ

Противоположность депрессии

ОРУДИЯ ОБЕЗЬЯН

Удивительные находки археологов

ISSN 0208-0621



19005



9 770208 062001

