

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Ежемесячный
научно-информационный
журнал

www.sci.ru.org

5/6 2021

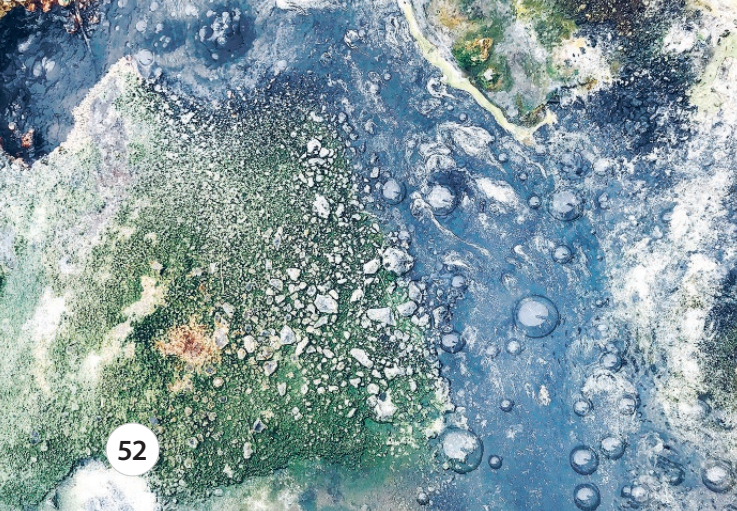
12+

НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП НА ДНЕ БАЙКАЛА // ЗАГАДКА ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

МАТЕМАТИКА СОЗДАНИЯ СВЯЗЕЙ

Теория, разъясняющая принцип
работы сетей: от мобильной
связи до контроля над
распространением *COVID-19*





52



32

Темы номера

МАТЕМАТИКА

Математика создания связей

Келси Хьюстон-Эдвардс

Теория перколяции дает ключ к пониманию многих математических моделей — от сотовой связи до распространения болезней

ФИЗИКА

Нейтринный телескоп на дне Байкала

Анастасия Пензина

Почему ученые так рьяно ищут нейтрино? Зачем детекторы устанавливают под скальной породой, толщей льдов и на подводных глубинах? Об этом и многом другом рассказывают член-корреспондент РАН **Григорий Домогацкий** и академик **Борис Шарков**

МЕДИЦИНА

Спровоцировать, чтобы вылечить

Наталья Лескова

Почему страдающих нейродегенеративными заболеваниями становится все больше? Можно ли диагностировать эти патологии на ранних стадиях и научиться полностью их излечивать? Отвечает академик **Михаил Угрюмов**

НЕЙРОНАУКИ

Мыслящая гиперсеть

Ольга Беленицкая

Академик **Константин Анохин** считает, что у XXI в. есть все шансы войти в историю революционными открытиями в области изучения человеческого мозга



14

СОДЕРЖАНИЕ

Май/июнь 2021

4

МЕДИЦИНА

Клеточные технологии: от мифов к реальности

Анастасия Пензина

О потрясающих возможностях клеточных технологий рассказывает член-корреспондент РАН **Андрей Васильев**

42

МИКРОБИОЛОГИЯ

«Мы знаем лишь один процент из всего многообразия микробов»

Янина Хужина

Член-корреспондент РАН **Елизавета Бонч-Осмоловская** — о задачах, загадках, красоте и важности микробиологии

52

АСТРОНОМИЯ

Иные луны

Ребекка Бойл

Гонка, цель которой — открыть первый спутник планеты вне Солнечной системы, уже стартовала

60

32

Видеть без изъянов

Фрэнсис Беннет, Селин д'Оржевиль и Тони Травуйон Инструмент, созданный для астрономии, обретает новую жизнь в борьбе с космическим мусором и обеспечивает квантовое шифрование

70



108



136



60

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Взгляд с обратной стороны Луны 78

Анил Анантасвами

Новые лунные телескопы будут всматриваться в темные века Вселенной, тающие в себе зародыши звезд

ПСИХОЛОГИЯ

Побороть стресс, вызванный пандемией 84

Мелинда Уэннер Мойер

Кризис, спровоцированный COVID-19, длится уже больше года, и это тяжело сказывается на психическом здоровье людей по всему миру

НАУКА И ОБЩЕСТВО

COVID-19: защита от дезинформации 92

Кэтлин Холл Джеймисон

Восемь важных рекомендаций, как сохранять здравомыслие и вести себя адекватно в сложившейся ситуации

ФИЗИКА ЧАСТИЦ

Последняя битва темной материи 100

Клара Москович

В новом эксперименте могут быть пойманы невидимые частицы, которые ускользали от предыдущих детекторов

ПЛАНЕТОЛОГИЯ

Удивительная наука о хондрах 108

Джонатан О'Каллаган

Изучение материала астероида Рюгу может помочь ученым наконец выяснить происхождение загадочных объектов и узнать, что они могут рассказать нам о рождении Солнечной системы

АРХЕОЛОГИЯ

Истоки дома 118

Аннали Ньюиц

Город возрастом в 9 тыс. лет раскрывает секреты того, какой была наша жизнь на заре оседлости

ЭНЕРГЕТИКА

Как верно использовать природный газ 126

Майкл Уэббер

Масштабная инфраструктура газовой отрасли грозит стать препятствием для декарбонизации энергосистемы

ОХРАНА ПРИРОДЫ

100 лет кольцевания птиц 136

Кейт Вонг

Богатейший архив данных проливает свет на тайную жизнь пернатых

БИОМЕХАНИКА

Полеты фантазии 144

Террил Уитлэч и Майкл Хабиб

Палеонтолог и иллюстратор воссоздают мифических существ, строго следуя законам биомеханики

Разделы

От редакции 3

50, 100, 150 лет тому назад 91, 152



118



84

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Наши партнеры:



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



РОСАТОМ



Сибирское отделение РАН



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.А. Садовничий

Главный научный консультант:

президент РАН акад. А.М. Сергеев

Ответственный секретарь:

О.Л. Беленицкая

Шеф-редактор иностранных материалов:

А.Ю. Мостинская

Выпускающий 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:

З.Х. Мусина

Научные консультанты:

акад. К.В. Анохин; член-корр. РАН Е.А. Бонч-Осмоловская; член-корр. РАН А.В. Васильев;
член-корр. РАН Г.В. Домогацкий; к.ф.-м.н. В.Г. Сурдин; акад. М.В. Угрюмов;
акад. Б.Ю. Шарков

Над номером работали:

М.С. Багоцкая, А.П. Кузнецов, Н.Л. Лескова, А.И. Пензина, А.И. Прокопенко, О.С. Сажина,
В.И. Сидорова, Д.С. Хованский, Я.Р. Хужина, Н.Н. Шафрановская, А.В. Щеглов

Дизайнер:

Д.А. Гранков

Верстка:

А.Р. Гукасян

Корректора:

М.А. Янушкевич

Фотографы:

Н.Н. Малахин, Н.А. Мохначев

Директор НП «Международное партнерство

распространения научных знаний»:

А.Ш. Геворгиян

Заместитель директора НП «Международное партнерство

распространения научных знаний»:

В.К. Малахина

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:

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

Заказ № 0575

© 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.



Время раскрывать тайны

Обратную сторону Луны не видно с Земли, и это всегда порождало много мифов и легенд. Похоже, настало время попрощаться с этой загадкой. Автор статьи «Взгляд с обратной стороны Луны» считает, что на той стороне нашего спутника в ближайшее время появятся множество радиотелескопов и орбитальных станций. Это место защищено от радиоизлучения Земли и поэтому идеально подходит для поиска свидетельств первых нескольких сот миллионов лет после Большого взрыва.

Воображение людей волнует не только другая сторона Луны, но и она сама. Луна стабилизирует наш климат, и, собственно, без нее Земля бы не была Землей. Астрономы близки к тому, чтобы зарегистрировать первые экзолуны — спутники, обращающиеся вокруг экзопланет в далеких околозвездных системах. Они покажут, насколько такое партнерство распространено в иных галактиках и что оно означает. Узнайте подробности из статьи «Иные луны».

На дне озера Байкал создается уникальный экспериментальный комплекс — подводный

нейтринный телескоп, который позволит ученым исследовать нейтрино — самую загадочную элементарную частицу, для которой материя почти прозрачна. Почему ученым так важны эти исследования? Они должны пролить свет на наше понимание самых ранних стадий возникновения Вселенной, темной материи и темной энергии, эволюции звезд, Солнца, Земли и т.д. Этой теме посвящен материал «Нейтринный телескоп на дне Байкала».

Как бы ни было важно изучать эволюцию нашей Вселенной, главная тайна — это мозг человека. «Я убежден, что время разгадки сокровенных секретов мозга уже наступило», — утверждает нейробиолог академик К.В. Анохин. Тайну возникновения и функционирования сознания поможет раскрыть созданная им гиперсетевая теория мозга. В статье «Мыслящая гиперсеть» К.В. Анохин рассказывает, как возникла эта теория и на какие вопросы она ответит. ■

Редакция журнала «В мире науки / Scientific American»

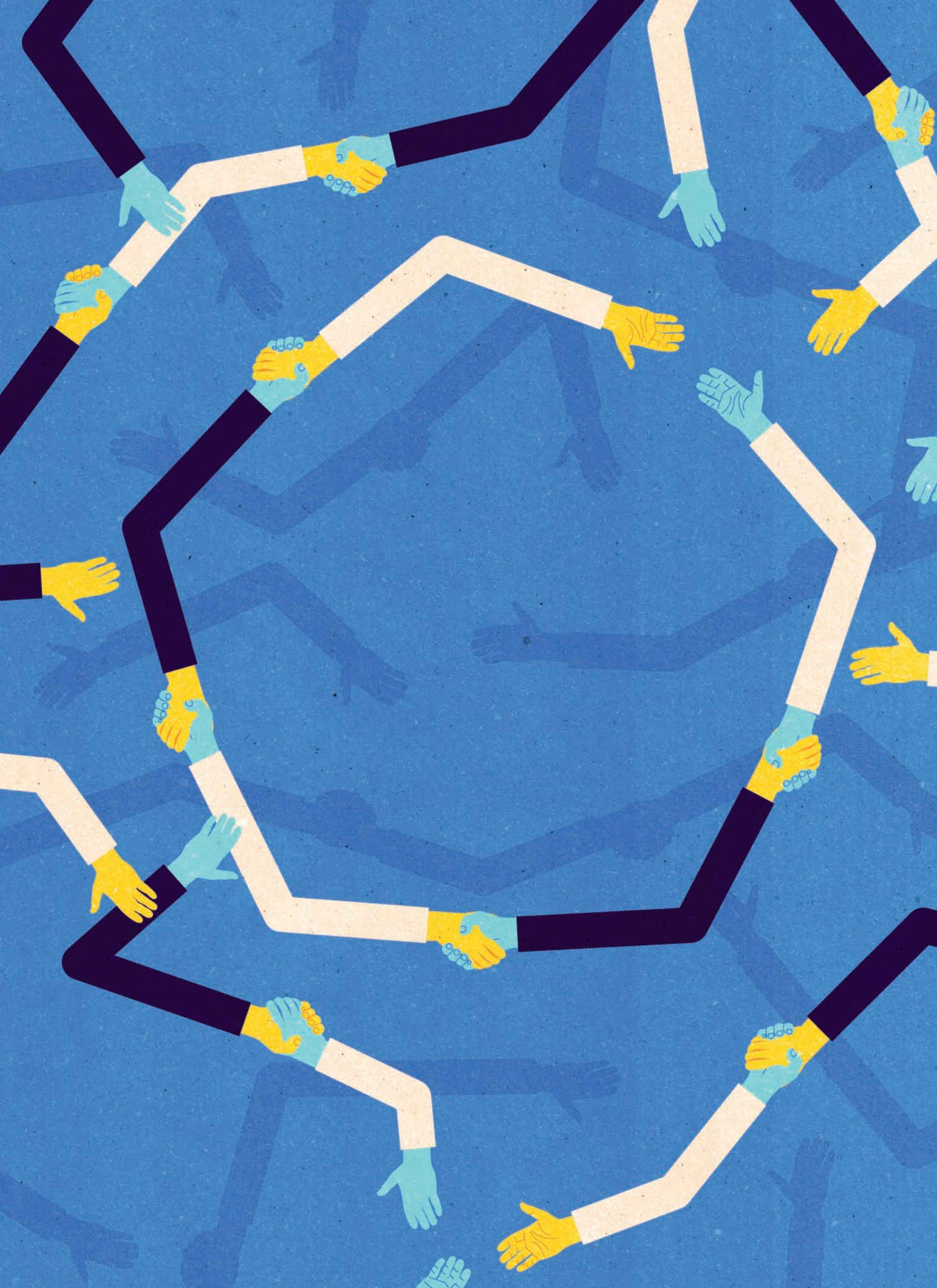
An illustration on a blue background showing several stylized arms and hands in various colors (yellow, teal, black) reaching out and connecting to form a network. Some hands are holding each other, while others are open. The overall shape suggests a complex, interconnected structure.

МАТЕМАТИКА

Математика создания связей

Теория перколяции дает ключ к пониманию многих математических моделей — от сотовой связи до распространения болезней

Келси Хьюстон-Эдвардс



ОБ АВТОРЕ

Келси Хьюстон-Эдвардс (Kelsey Houston-Edwards) — математик и журналистка, автор и ведущая онлайн-шоу *PBS Infinite Series*.



Легко представить, что вы нажимаете кнопку «отправить» — и текстовое сообщение перемещается прямо с вашего телефона на телефон адресата. Но в реальности оно проходит долгий путь через сотовую сеть или интернет, и в том и в другом случае используя централизованную инфраструктуру, которая может быть повреждена в результате стихийных бедствий или отключена по указу правительства. Опасаясь наблюдения или вмешательства со стороны государства, технически подкованные протестующие в Гонконге избегали выходить в интернет, используя такие мессенджеры, как *FireChat* и *Bridgify*, для отправки сообщений непосредственно между находящимися по соседству телефонами.

Эти приложения обеспечивают передачу информации с одного телефона на другой, в конечном счете выстраивая связь между отправителем и получателем — единственными пользователями, способными просматривать сообщение. Множества связанных друг с другом телефонов образуют так называемые ячеистые сети (*mesh-сети*), или беспроводные децентрализованные самоорганизующиеся сети (*MANET*), обеспечивающие гибкий режим связи при отсутствии базовых центральных узлов. Но если вы захотите связать таким образом два произвольных телефона, необходимо создать сеть из других, «промежуточных» устройств. Какое количество людей, разбросанных по Гонконгу, необходимо подключить к одной и той же ячеистой сети, чтобы обеспечить связь, охватывающую весь город?

Раздел математики, который называется теорией перколяции (или теорией протекания), предлагает удивительный ответ: всего несколько человек могут иметь решающее значение. По мере увеличения количества пользователей растут и изолированные до поры до времени кластеры из подключенных телефонов. Но полноценная сеть, охватывающая весь город с востока на запад или с севера на юг, возникает внезапно, когда плотность пользователей превышает определенное критическое значение. В терминах термодинамики такое скачкообразное изменение связности сети можно описать как фазовый переход — та же концепция используется для объяснения резких изменений состояния материала, таких как таяние льда или кипение воды.

Теория перколяции изучает образование целостных структур при случайном возникновении или исчезновении связей между отдельными элементами. С точки зрения математической модели речь идет о сетях или графах, которые можно представить как набор узлов (точек), соединенных ребрами (линиями). Каждый узел представляет собой объект (например, человека или телефон), а ребра — это определенные отношения между парой этих объектов. Ключевое открытие теории перколяции, появившейся в 1950-х гг., состоит в том, что при постепенном увеличении количества связей в сети внезапно наступает критический момент образования глобального кластера связанных друг с другом объектов.

Главный вопрос состоит в том, как определить этот критический момент. Как для каждой конкретной сети вычислить этот параметр, аналогичный нулевому градусу по Цельсию, при котором тает лед, или 100 градусам, при которых закипает вода? В какой момент интернет-мем становится вирусным, продукт начинает доминировать на рынке, происходит землетрясение, сотовые телефоны формируют связную сеть,

а болезнь становится пандемией? Теория перколяции дает представление обо всех этих переходах.

Как правило, математики имеют дело с абстрактными сетями, бесконечными по протяженности, симметричными и имеющими правильную геометрическую форму, — так удобнее для построения теорий и вычислений. Кроме того, фазовые переходы становятся наиболее заметными именно в бесконечных системах. Реальные сети имеют ограниченную протяженность, беспорядочную структуру и требуют более сложных вычислений. Однако и здесь можно говорить о фазовых скачкообразных переходах, пусть и не так явно выраженных.

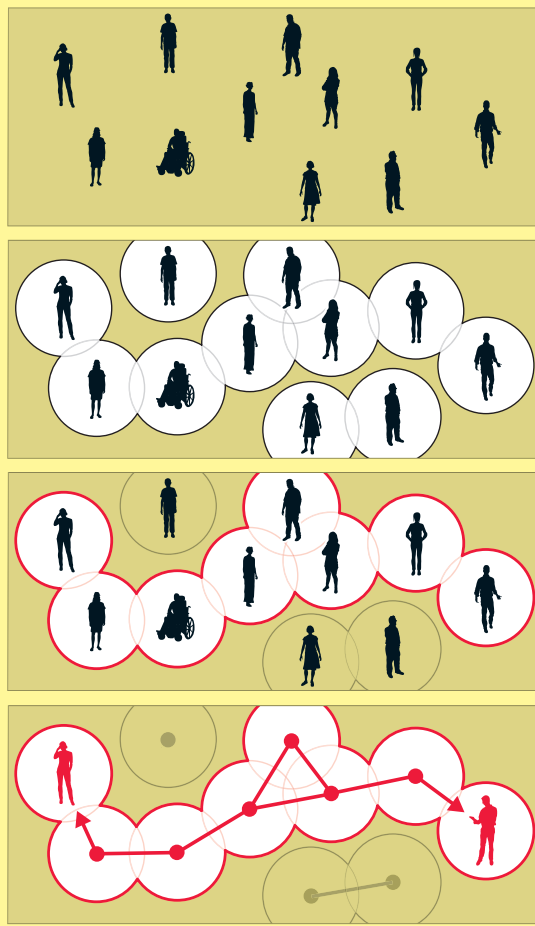
Но по мере увеличения и усложнения способов взаимодействия между людьми начиная от транспорта, снабжения электроэнергией, общения в социальных сетях и заканчивая распространением болезней, по мере того как мир становится все более «связным», растет актуальность теории перколяции.

Ключевая теория

В 1957 г. британские математики Саймон Ральф Бродбент (Simon Ralph Broadbent) и Джон Майкл Хаммерсли (John Michael Hammersley) впервые сформулировали задачу о перколяции как чисто математическую. Они абстрагировались от изучения «процессов протекания» в химии, описывающих фильтрацию жидкости через какой-либо материал, например просачивание масла через пористую породу или фильтрацию воды через молотый кофе. Если говорить о горной породе, то узлы сети — это небольшие отверстия и полости в камне, а соединяющие их ребра — это микроканалы и трещины, позволяющие жидкости просачиваться сквозь породу. Неудивительно, что нефть проходит дальше через более пористую среду с большим количеством трещин. Используя теорию перколяции, Бродбент и Хаммерсли показали, что при превышении плотностью трещин в породе определенного критического значения произойдет резкий скачок. До этого значения нефть будет протекать только через отдельные небольшие участки, после — практически через весь заданный объем породы.

Аналог теории перколяции используется в геологии для изучения размеров кластеров в трещиноватой породе и находит широкое практическое применение — от добычи нефти методом гидроразрыва пласта до выявления причин землетрясений. В последнем случае сейсмологи создают

Ячеистые сети



перколяционные сети, соответствующие масштабу и плотности наблюдаемых трещин, а затем вычисляют напряжения, регулируя вероятность соединения трещин. По мере увеличения напряжений и роста количества связей кластеры расширяются, пока внезапно не произойдет землетрясение. Более сложные модели процесса перколяции, учитывающие «затягивание», исчезновение трещин наряду с их повторным появлением, позволяют описывать толчки и долгосрочные изменения системы.

Теория перколяции применяется также для изучения физических и химических процессов в гораздо меньших масштабах, таких как, например, процесс полимеризации, при котором отдельные молекулы (мономеры) связываются вместе и образуют более крупные кластеры — полимеры. В рамках теории перколяции каждый номер рассматривается как узел сети, а два соседних узла могут спонтанно образовывать связь друг с другом. Если вероятность их объединения возрастет, система в конечном итоге достигнет порога перколяции

и превратится в один гигантский связанный полимер. Этот процесс заставляет порошкообразный желатин, растворенный в воде, застывать и превращаться в желе.

Сети в трещиноватой породе или связанных полимерах сложны настолько, что почти невозможно в точности описать их структуру. Но Бродбент и Хаммерсли показали, что эти сети могут быть аппроксимированы повторяющимися шаблонами, которые в свою очередь поддаются анализу. Самый простой пример — квадратная решетка, которая выглядит как бесконечный лист миллиметровой бумаги: каждый элемент, расположенный в узлах сетки, соединен четырьмя ребрами со своими соседями.

Чтобы увидеть, как жидкость может проходить через эту решетку, представьте, что каждый крошечный отрезок на миллиметровой бумаге — это труба, которая может быть либо открыта, либо закрыта. Состояние каждой трубы определяется случайным образом, подбрасыванием монеты с надписью «открыто» с одной стороны и «закрыто» с другой. В результате образуется система открытых и закрытых каналов — случайная сеть, имеющая некоторое количество «открытых» кластеров, в которых все узлы соединены серией открытых каналов. Если вы выльете воду в любой узел такого кластера, она потечет через открытые трубы и достигнет всех других узлов данного кластера.

Теория перколяции исследует связность сети, которая зависит от того, насколько велики «открытые» кластеры. Но «большой» кластер — понятие неоднозначное, оно не легко поддается строгому математическому определению. Вместо неопределенно больших чисел математикам удобнее иметь дело с бесконечностью. Тогда центральным вопросом становится: существует ли бесконечный «открытый» кластер? «Для нас гораздо легче ответить на этот общий вопрос "да" или "нет", чем заниматься исследованиями отдельных кластеров того или иного размера», — говорит Бенедикт Янел (Benedikt Jahnel), математик из Института прикладного анализа и стохастики Вейерштрасса в Берлине.

Фактически вероятность того, что бесконечная сеть будет иметь бесконечный кластер, всегда равна 0 или 1. Это связано с тем, что процесс перколяции подчиняется общему принципу теории вероятностей, известному как «закон нуля или единицы», открытому А.Н. Колмогоровым в 1930-х гг. Предположим, вы подбрасываете монету бесконечное количество раз. Закон нуля

или единицы применим к любым вопросам об исходе, ответ на которые не зависит от какого-либо конечного числа подбрасываний. (Например, ответ на вопрос «Орел выпал бесконечно много раз?» останется прежним, если вы измените конечное число подбрасываний монеты. В то же время ответ на вопрос «На третьем броске выпал орел?» зависит от одного конкретного подбрасывания монеты.)

Закон нуля или единицы говорит нам, что конечные изменения не могут нарушить бесконечные по своей природе явления. Таким образом, вероятность обнаружения бесконечного кластера в бесконечной сети не может незначительно измениться, например с 0,81 до 0,82. Другими словами, в бесконечной сети либо будет существовать бесконечный кластер (вероятность равна единице), либо нет (вероятность равна нулю).

Таким образом, переключение конечного числа открытых труб на закрытые (или наоборот) не влияет на существование бесконечного открытого кластера. Вероятность найти его равна нулю или единице. Так чему же в итоге?

Пороговое значение

Ответ зависит от «характера» вашей монеты. Представьте, что у вас есть реле, которое контролирует этот «характер». Крайнее левое положение реле соответствует ситуации, когда монета постоянно выпадает стороной «закрыто». Все трубы при этом остаются перекрытыми, вода никуда не течет, а вероятность нахождения бесконечного кластера равна нулю. Вращая реле по часовой стрелке, вы увеличиваете вероятность того, что подброшенная монета упадет другой своей стороной, и открытых труб становится все больше. Крайнее правое положение, очевидно, соответствует ситуации постоянного выпадения «открыто» и распространения воды по всем без исключения узлам. Вероятность нахождения бесконечного кластера теперь равна единице.

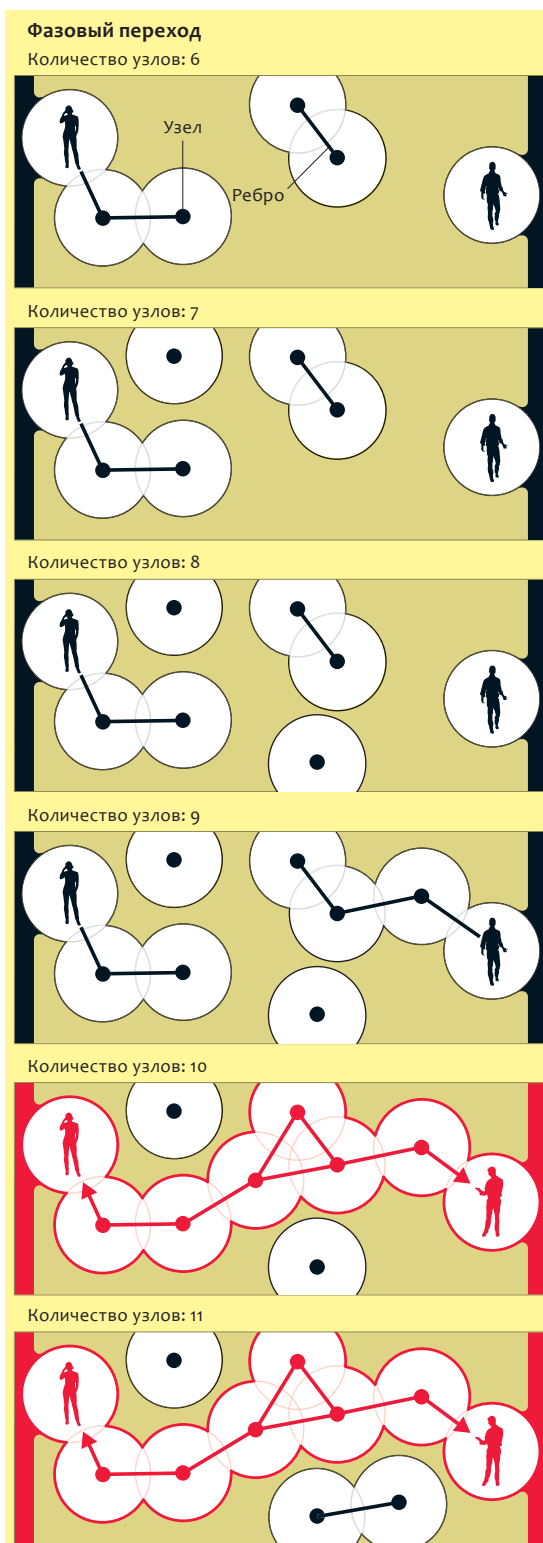
При непрерывном вращении этого реле по часовой стрелке вероятность открытия труб увеличивается постепенно, и может показаться, что вероятность обнаружения бесконечного кластера также должна непрерывно возрастать от нуля до единицы. Но фактически это изменение происходит мгновенно из-за закона нуля или единицы, вероятность не может принять промежуточное значение. Для квадратной решетки этот скачок происходит в тот момент, когда

реле находится точно посередине, то есть когда монета ведет себя обыкновенно и не обладает «характером». Это критическое положение нашего воображаемого реле известно как порог перколяции. Независимо от формы сети — будь то, например, треугольная решетка или же трехмерная версия квадратной решетки — основной вопрос теории перколяции остается неизменным: как определить пороговое значение? Насколько «необъективной» должна быть монета, чтобы образовалось достаточное количество связей, гарантирующее существование открытого кластера?

Ответ зависит от точной формы (бесконечной) сети, и его далеко не так просто найти. Даже доказать, что порог для квадратной решетки — простейшей системы — равен $1/2$, уже было непростой задачей, которую решил математик Гарри Кестен (Harry Kesten) в 1980 г. И сегодня, несмотря на десятилетия усилий, точные пороги перколяции известны только для нескольких чрезвычайно простых сетей. «Проделана огромная работа по определению пороговых значений перколяции. Поразительно, сколько различных систем было исследовано», — говорит Роберт Зифф (Robert M. Ziff), ученый из Мичиганского университета, специализирующийся в области статистической физики. Зифф создал страницу в «Википедии», куда заносит данные о порогах перколяции для сотен различных сетей. Для треугольной решетки это значение определяется аналитически и составляет примерно 0,347. Однако подавляющее большинство числовых значений на этой странице (включая порог перколяции трехмерной квадратной решетки) представляют собой приближения, полученные с помощью компьютерного моделирования.

Ячеистая топология

Вышеупомянутые решетки — хороший способ моделирования перколяции в физических системах, таких как трещиноватая горная порода, где пустоты-узлы находятся в фиксированных местах, а трещины между ними образуются случайным образом. Но другие сети в реальном мире намного сложнее. Например, в уже упомянутых мессенджерах *FireChat* и *Bridgify* местоположение узлов-смартфонов гонконгских протестующих постоянно менялось. Связи-соединения в такой сети образуются, когда два телефона находятся достаточно близко друг к другу, в пределах нескольких десятков метров — диапазона, в котором работают



приложения на основе *Bluetooth*. Поскольку узлы такой сети могут находиться в произвольной точке заданного пространства, для их описания используется другая модель — так называемой континуальной перколяции.

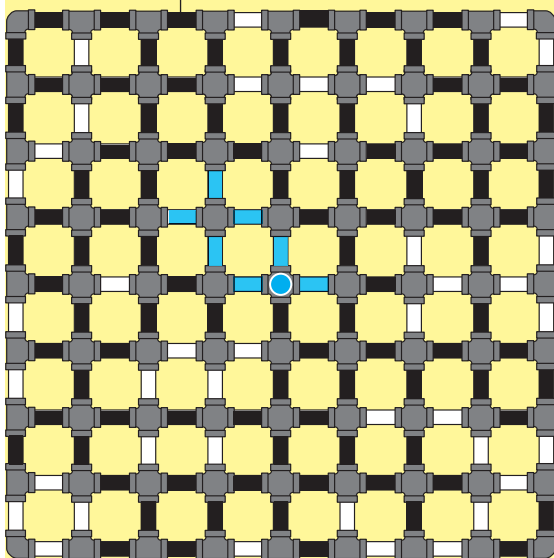
Математическая модель этой сети, как всегда, основывается на некоторых допущениях. Во-первых, расположение телефонов можно считать случайным и не принимать во внимание какие-либо естественные скопления или организованные перемещения людей. Во-вторых, единственный фактор, влияющий на связь двух людей (телефонов)

друг с другом, — это расстояние между ними. Никакие помехи, преграды, стены и прочие препятствия во внимание не принимаются. И все же данная модель показывает, какую важную роль играет теория перколяции в ячеистых сетях.

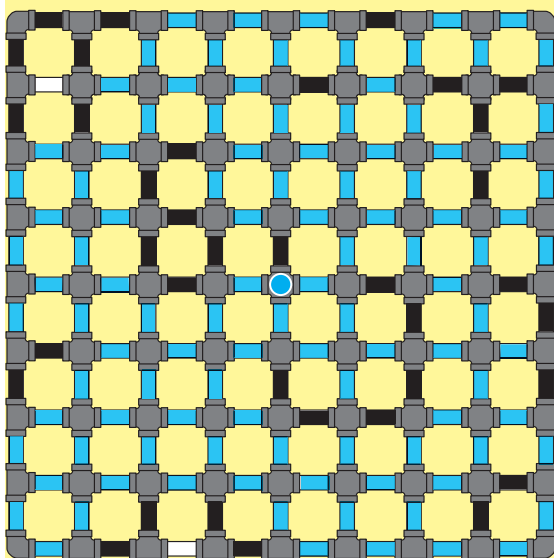
Квадратная решетка

Рассмотрим квадратную решетку из труб размером 9×9 . Считая, что каждая труба открыта с вероятностью $1/3$, будем наливать воду в центральный узел (синий). В результате поток остановится, достигнув шести соседних узлов.

Закрытая труба (черная)



Если каждая труба будет открыта с вероятностью $3/4$, то вода, заполняя соседние узлы, достигнет границ решетки.



Существуют два способа увеличить охват этой непрерывной перколяционной сети: обеспечить прямое подключение к ней на большем расстоянии или добавить определенное количество узлов-телефонов, повышая плотность сети. Эти модификации можно рассматривать как своего рода реле, подобные тем, которые помогли нам лучше понять устройство трубопроводных сетей. Поворот любого из них по часовой стрелке увеличит возможность подключения. И в этих моделях «есть переключатель, с помощью которого осуществляется переход от локального к глобальному подключению», — говорит Янель.

Для разработчиков приложений, основанных на ячеистой топологии, определение порога перколяции — практическая инженерная задача. Один из способов «повернуть реле» — это изменить мощность устройства, которая влияет на дальность приема сигнала. По словам Рама Раманатана (Ram Ramanathan), старшего научного сотрудника компании *goTenna*, занимающейся ячеистыми сетями, «главный вопрос в том, какой должна быть мощность передачи сигнала для обеспечения связности сети». Ответ был бы простым, если бы мощность передачи и возможность подключения имели линейную зависимость, если бы небольшое увеличение мощности привело к пропорциональному увеличению возможности подключения. Но наличие порога перколяции означает, что существует риск внезапного разрыва сети и потери подключения при перемещении людей. Оптимальная мощность — это мощность, обеспечивающая постоянное подключение к сети без потери энергии.

Другой фактор — плотность телефонов на заданной площади. Ячеистым сетям с фиксированным радиусом действия требуется критическая плотность пользователей. С большей вероятностью они способны обеспечить соединение на многотысячных мероприятиях, таких как музыкальный фестиваль, футбольный матч или крупная акция протеста. Хорхе Риос (Jorge Rios), генеральный директор и соучредитель *Bridgefy*, говорит, что его компания наблюдала резкое увеличение количества новых пользователей в Кашмире, Нигерии, Гонконге

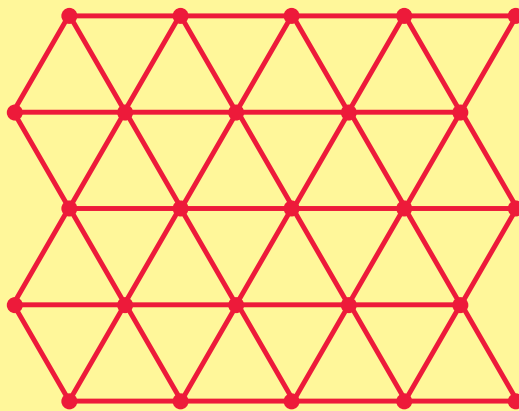
и Иране в периоды массовых беспорядков. Люди обращались к ячеистым сетям для поддержания связи в случае особых мер, принятых правительствами по ограничению интернета, или из-за перебоев в работе сотовой связи, вызванных большим скоплением людей. Некоторые районы, такие как Ред-Хук в Бруклине, штат Нью-Йорк, используют ячеистые сети для расширения доступа в интернет, закрепляя постоянные узлы сети на крышах зданий. Большая часть необходимого оборудования и технологий маршрутизации все еще находится на стадии развития. Но уже сейчас легко можно представить себе смелые футуристические приложения: автономные транспортные средства, «общающиеся» непосредственно друг с другом и обменивающиеся информацией о дорожном движении или опасностях на дороге без какой-либо дополнительной инфраструктуры.

Сети распространения болезней

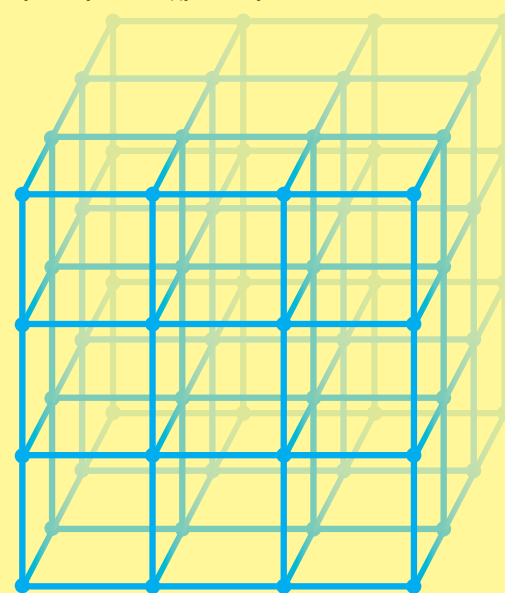
Сети, используемые для моделирования просачивания нефти через горные породы или прямой связи между телефонами, имитируют реальную пространственную структуру этих систем: два узла соединены ребром, если объекты, которые они представляют, расположены близко друг к другу в физическом пространстве. Но для сетей, отслеживающих распространение болезни от человека к человеку, связи определяются способами передачи конкретного заболевания. Такие сети особенно запутанны: один инфицированный человек, проводящий час в ночном клубе большого города, способен передать вирус человеку, который разнесет его по всей стране или даже по континентам за считанные дни.

В элементарных эпидемиологических моделях каждого человека можно отнести к одной из трех групп: восприимчивых, инфицированных и выздоровевших, что сильно упрощает структуру связей. В таких моделях носители инфекции случайным образом заражают группу восприимчивых людей, если исходит из предположения, что все в этой группе — студенты общежития или жители целого города — имеют равные шансы заразиться. Скорость заражения в данном случае зависит от так называемого индекса репродукции R_0 — среднего числа новых заболеваний, вызванных одним инфицированным человеком. Если этот показатель больше единицы, значит вирус распространяется, а если меньше, то вспышка эпидемии угасает.

Треугольная решетка



Трехмерная квадратная решетка



Однако, как показывает практика, на распространение болезни влияет и характер взаимодействия людей друг с другом. Например, индекс репродукции R_0 атипичной пневмонии (SARS) в 2003 г. первоначально варьировал от 2,2 до 3,6. Но, по словам Лорен Ансель Мейерс (Lauren Ancel Meyers), ныне директора Консорциума моделирования COVID-19 Техасского университета в Остине, количество выявленных случаев было «намного ниже, чем ожидалось в этот период на основании простых расчетов». Она утверждала, что это несоответствие вытекает из сомнительного предположения о том, что «все восприимчивые люди с равной вероятностью заразятся», которое игнорирует сложную структуру сетей, построенных на контактах людей друг с другом. В частности, расчетные значения R_0 для атипичной пневмонии были основаны

на быстром распространении заболевания в многоквартирных домах и больницах, то есть местах, которые характеризуются «аномально высоким уровнем тесных контактов между людьми». Но в случае атипичной пневмонии отрезок времени между инфицированием и заболеванием сравнительно небольшой, поэтому все заболевшие довольно быстро попадали в больницы, не успевая заразить большое количество людей за их пределами.

Важную роль играет сущность связей между узлами сети распространения болезни. Если, например, речь идет о сети, представляющей распространение ВИЧ, то два человека (узла) оказываются связанными в том случае, если произошел обмен жидкостями их организмов. Сеть, показывающая потенциальное распространение *COVID-19*, имеет совершенно другую структуру свя-

От элементарных сетей к более сложным, от абстрактных математических теорий к детальному компьютерному моделированию и далее — к системам, моделирующим реальность

зей, представляющую тесный контакт без защиты органов дыхания. Всевозможные карантинные меры и блокировки, такие как закрытие предприятий и ограничение поездок, изменяют эту структуру связей и наряду с ношением масок и физическим дистанцированием предотвращают передачу вируса от одного человека к другому. Одна из задач эпидемиологов — найти способы разомкнуть сеть, в достаточной степени раздробить ее на отдельные кластеры.

В реальности эпидемиологические сети (например, в случае *COVID-19*) чрезвычайно сложны и едва ли поддаются описанию. Но даже если была бы в точности известна структура этой сети, ее было бы крайне трудно проанализировать математически. Компьютерное моделирование используется для прогнозирования количества

случаев заболевания, для оценки влияния социального дистанцирования (один метр или два?) и количественной оценки значимости общественных мест (например, школ или ресторанов) в распространении новой коронавирусной инфекции. Алессандро Веспиньяни (Alessandro Vespignani), ученый, специализирующийся на теории сложных сетей, из Северо-Восточного университета в Бостоне, называет это исследование работой «военного времени» — тактической и иногда беспорядочной, но дающей немедленные численные результаты, в которых нуждаются политики и медицинские работники. По его словам, ученые создают «своего рода синтетическое общество, в котором каждый из нас, действительный или потенциальный участник эпидемиологической сети, упакован в компьютер» для моделирования.

В противовес этому исследованию «мирное время» для Веспиньяни — это «возможность детально разработать модель, откалибровать ее, исследовать конкретные подходы, найти пути увеличения точности результатов». Чтобы получить теоретическое представление о том, как форма и структурные особенности сети влияют на распространение болезни, ученые обращаются к теории перколяции.

Основные математические подходы, используемые в теории перколяции, часто ограничены с точки зрения их реального применения и работают только в случае упорядоченных и симметричных систем. И все же «математика играет главную роль в этих исследованиях», — говорит Веспиньяни. Ученые, исследующие особенности эпидемиологических сетей, оперируют, например, таким понятием, как распределение степеней. Степень — это количество связей данного конкретного узла с другими. Предположим, что степень всех узлов квадратной решетки равна 4. Однако в случае построения сети распространения болезни степени узлов могут очень сильно различаться: некоторые участники контактируют гораздо больше других и потенциально могут заразить большее количество людей, чем, например, те, кто находится в изоляции.

Распределение степеней описывает распределение вероятностей той или иной степени в сети. В моделях, исследующих распространение болезней, это означает вероятность заразить (или потенциально быть зараженным) определенное количество других людей. Чтобы понять, как этот параметр

влияет на порог перколяции, такие ученые, как Мейерс, генерируют тысячи случайных сетей, объединенных лишь одной особенностью: все они имеют одинаковое распределение степеней. Этот подход позволяет лучше понять роль, которую данный параметр играет в общей структуре сети. По словам Мейерса, если свойства сгенерированных сетей совпадают с реальностью, то распределение степеней или любые другие «чисто математические» параметры, вероятно, будут иметь непосредственное отношение к распространению болезни.

Исследования показывают, что порог перколяции для сети падает, если сеть имеет более широкое распределение степеней, что означает более широкий диапазон степеней узлов. Таким образом, болезнь будет быстрее распространяться в сети, где есть как изолированные участники, так и люди с большим количеством контактов, чем в сети, где количество связей у всех примерно одинаковое. Джоэл Миллер (Joel Miller), математик и эпидемиолог из Университета Ла Троба в Мельбурне, эвристически объясняет это наблюдение: «Если у меня будет в десять раз больше контактов, чем у вас, я не только имею в десять раз больше шансов заразиться, но и могу заразить в десять раз больше людей, так что это в 100 раз важнее с точки зрения распространения болезни».

Сети будущего

Теория перколяции используется и для моделирования других явлений «заражения»: например, когда мем в социальной сети постепенно становится все более популярным, прежде чем внезапно превратиться в вирусный. Применяя эту теорию к экономическим моделям, можно показать, как конкретный продукт способен быстро занять доминирующее положение на рынке. Это связано в том числе и с тем, что люди делятся рекомендациями среди своих контактов в соцсетях. Модели выборов, в которых отдельные люди влияют на свою аудиторию, также демонстрируют пороговые эффекты.

В отличие от бесконечных, упорядоченных и симметричных сетей, традиционно выступавших объектом изучения для математиков, сети, моделирующие реальные объекты, обладают свойствами конечности и определенной хаотичности. Такие сети не сразу переходят от перколяции в небольших кластерах к полной связности, как это делают их бесконечные аналоги, но для них все равно характерна высокая скорость переключения. Чтобы лучше понять эти

процессы, ученые и исследователи переходят от теоретической математики к компьютерному моделированию. От элементарных сетей к более сложным, от абстрактных математических теорий к детальному компьютерному моделированию и далее — к системам, моделирующим реальность.

Многие важнейшие сетевые модели распространения *COVID-19* объединяют в себе информацию, полученную из других сетевых моделей. Графики учебы в школах, маршруты поездов, режим работы больниц — все это сети, и каждая из них влияет на ход пандемии. «Мы живем в этой системе взаимозависимых сетей и не можем анализировать одну, не принимая во внимание другие», — говорит Раисса Д’Суза (Raissa D’Souza), ученый, специализирующийся в теории сложных сетей из Калифорнийского университета в Дейвисе. Каждая сеть — отдельная сложная система со своим собственным поведением. Мы все чаще объединяем эти сети, чтобы создать еще более сложную систему, но стройной теории для изучения таких «сетей сетей» пока нет. Это задача для будущих исследований.

«Мы не живем ни в изолированном пузыре, ни в каком-то хаотично перемешанном мире. Мы находимся в мире контактов, мы общаемся в социальных сетях, именно здесь и проявляются теория перколяции и другие модели», — говорит Веспиньяни. Сегодня понимание этих математических и, на первый взгляд, исключительно теоретических моделей «может изменить ситуацию в будущем». Теория перколяции легко адаптируется в меняющемся мире. Она открывает новые горизонты для математиков и практические приложения для ученых. И все эти разнообразные модели объединяет одна удивительная особенность: всегда есть критическая точка, поворотный момент. Всегда лишь несколько новых элементов оказываются решающими, и именно они связывают огромную сеть воедино. По мере увеличения количества всевозможных связей в современном мире растет и необходимость понимания этой важнейшей теории. ■

Перевод: Д.С. Хованский

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Хьюстон-Эдвардс К. Игра чисел // ВМН, № 11, 2019.



ФИЗИКА

НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП НА ДНЕ БАЙКАЛА

Нейтрино — самая загадочная элементарная частица, для которой материя почти прозрачна. Нейтрино неуловимо, и требуются огромные объемы вещества, чтобы зарегистрировать немногочисленные события.



Член-корреспондент РАН Г.В. Домогацкий

П

очему ученые так рьяно ищут эту частицу? И зачем детекторы нейтрино устанавливаются под сотнями метров скальной породы, толщиной антарктических льдов и на километровой глубине озера Байкал? Об этом и многом другом рассказывают член-корреспондент РАН **Григорий Владимирович Домогацкий**, руководитель лаборатории нейтринной астрофизики высоких энергий Института ядерных исследований РАН, и академик **Борис Юрьевич Шарков**, вице-директор Объединенного института ядерных исследований в Дубне.

— **Григорий Владимирович, нейтрино называют самой загадочной частицей. Почему?**

— Во-первых, нейтрино достаточно сложно изучать, поэтому многие свойства этой частицы до сих пор неизвестны. Мы не знаем, каковы ее масса, различия между сортами нейтрино и даже число возможных сортов. Именно поэтому так важно продолжать исследования, начатые еще в прошлом веке.

В контексте нашего сегодняшнего разговора, связанного с нейтринной астрофизикой, нейтрино выделяется среди остальных частиц. Во-первых, нейтрино крайне слабо взаимодействует с веществом и, когда оно путешествует по Вселенной, практически не встречает на своем пути никаких препятствий. Поэтому траектория нейтрино

не меняется. Если другие частицы испытывают на себе какие-то взаимодействия, встречают препятствия, рассеиваются либо отклоняются магнитными полями, то нейтрино путешествует беспрепятственно, поэтому эта частица в совершенно неискаженном виде несет в себе информацию об условиях, в которых она родилась. Это уникальный и единственный в своем роде инструмент изучения Вселенной.

— **Где может зародиться эта частица?**

— На это указывает энергия нейтрино. Так, нейтрино малых энергий образуются в результате распада радиоактивных элементов на Земле. Нейтрино более высоких энергий появляются в результате термоядерных реакций в недрах Солнца. Другой источник нейтрино — остатки взрывов сверхновых звезд, накопившиеся за время

эволюции Вселенной. Нейтрино высоких энергий возникают из-за мощных энерговыделений в ядрах галактик — квазарах. Исследуя разные типы нейтрино, можно получать ценную информацию об их происхождении.

— **Насколько мне известно, существуют три сорта, или, как физики их называют, аромата нейтрино. Почему используется такая терминология и какие сорта известны сегодня?**

— Нейтрино как частица появилось на свет в голове у физика-теоретика Вольфганга Паули для спасения закона сохранения энергии. Поэтому поначалу предполагалось одно нейтрино. Затем возникло подозрение, что их два: частица и античастица. Вскоре выяснилось, что нейтрино, которые рождаются при распаде радиоактивных ядер и при распаде мю-мезона, — это разные частицы. Далее сложилось представление, что и у тяжелого тау-мезона тоже должно быть свое нейтрино. Отсюда и возникло понятие ароматов. Впоследствии появилась идея о смешивании сортов нейтрино.

— **То есть это скорее условное обозначение?**

— Конечно.

— **Физики высказывают предположение о существовании четвертого типа — стерильного нейтрино. Что известно сейчас?**

— Пока это не более чем подозрения. Но наличие четвертого нейтрино вполне допускается. Стерильным оно названо потому, что практически не взаимодействует с веществом. Идея существования четвертого типа сформировалась при попытках найти объяснение ряду результатов экспериментов с рукотворными источниками нейтрино и в астрофизике. Так, первые данные микроволнового телескопа WMAP указывали на четыре типа нейтрино. А более поздние данные космического телескопа «Планк» предполагают три типа, но при этом не исключают четвертый. Проводились необходимые эксперименты, в том числе и в нашем институте в Баксанской подземной нейтринной обсерватории. Сегодня этот вопрос — абсолютно открытый и требует дальнейшего исследования. Но, скорее всего, четвертого типа не существует.

— **Высказываются предположения о возможном их происхождении?**

— Они могут возникать в потоке нейтрино известных сортов в результате их перехода в стерильные нейтрино.

— **Нейтрино, как и все элементарные частицы, могут превращаться в другие сорта. Этот механизм известен как осцилляция. Расскажите, в чем суть этого процесса?**

— Действительно, осцилляция — это переход частиц одного сорта в частицы другого сорта. Например, электронные нейтрино могут превращаться в мюонные, а мюонные — в электронные. Впервые идею о существовании подобного явления высказал Б.М. Понтекорво в 1950-е гг. В дальнейшем доводы ученого подтвердились в экспериментах на детекторе «Супер-Камиоканде» в Японии, в экспериментах с изучением потоков нейтрино от рождающихся в атмосфере частиц космических лучей высоких энергий, которые бомбардируют атмосферу.

— **Есть ответ, в чем причина подобных превращений?**

— Так мир устроен.

— **Так просто?**

— Да.

— **Ведутся разговоры о том, что нейтрино может быть ключевым элементом темной материи. Насколько это реально?**

— О темной материи мы вообще знаем очень мало. И говорить о какой-то связи пока рано. Темная материя существует, но состоит ли она из уже известных нам частиц — большой вопрос.

Скорее всего, при тех ограничениях на массу нейтрино, которые уже получены, эта частица слишком легкая, чтобы составлять темную материю. Поэтому на текущий момент нейтрино не пользуется популярностью как основной кандидат.

— **По какому принципу работают современные детекторы нейтрино? Почему многие из них расположены либо глубоко под водой, либо глубоко под землей?**

— Все детекторы природных потоков нейтрино требуют защиты от природных потоков других проникающих частиц космических лучей — мюонов. Это достигается размещением детекторов глубоко под землей или глубоко под водой, где поток мюонов подавлен на многие порядки величины. Чтобы изучать нейтрино разных диапазонов энергии, требуются и разные типы детекторов. Исторически первыми в нейтринной астрономии использовались радиохимические детекторы, различающиеся по используемому в них активному веществу, с которым взаимодействует нейтрино: хлорные

и галлиевые. Так, при взаимодействии низкоэнергетичных нейтрино с атомом галлия образуется атом германия. Анализируя количество радиоактивного германия, можно определить, какой поток нейтрино проходил через это вещество.

Следующий тип детекторов известен как сцинтилляционный. Регистрируются вспышка, создаваемая электроном отдачи при рассеянии на нем нейтрино, либо электрон (позитрон), родившийся при взаимодействии нейтрино с ядром вещества сцинтиллятора. Так, в эксперименте *Borexino* в качестве вещества детектора использовалась ультрачистая сцинтилляционная жидкость. Этот детектор был отличным поставщиком качественной информации о потоке нейтрино от Солнца.

Потоки нейтрино более высоких энергий (десятки и сотни миллиардов электрон-вольт) исследуются с помощью сцинтилляционных и водно-черенковских детекторов, позволяющих определять направление движения частицы. В данном случае нейтрино регистрируются по эффекту появления заряженных частиц, проходящих через чувствительный объем детектора в направлении снизу вверх. «Родителями» таких частиц могут быть только нейтрино, свободно проходящие через весь земной шар.

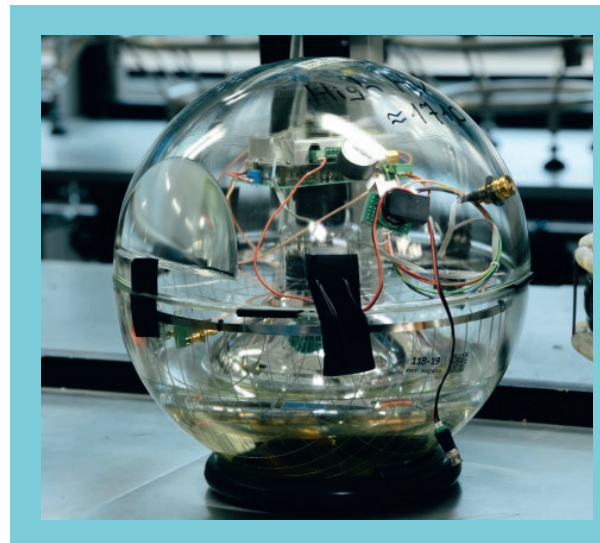
Но если мы хотим зарегистрировать нейтрино по-настоящему высоких энергий, свыше 10^{12} эВ, необходимы невероятно большие объемы вещества, вплоть до 1 км^3 , резервуар для которых невозможно создать искусственным путем.

В 1960-е гг. выдающийся физик М.А. Марков предложил использовать естественные водоемы для регистрации нейтрино с помощью многочисленных детекторов на глубине. В случае, когда энергия нейтрино больше 10^{15} эВ, сечение его взаимодействия сильно возрастает и Земля становится для него непрозрачной. Нейтрино взаимодействуют в толще Земли или в объеме детектора, рождая мюон, который движется в среде со сверхсветовой скоростью и излучает черенковский свет под строго определенным углом, зависящим от энергии мюона. Регистрируя этот свет с помощью детектора, можно определить энергию и направление мюона, а значит и родившего его нейтрино, поскольку мюоны при высоких энергиях с большой точностью сохраняют направление нейтрино.

— **С чего началась история Байкальского нейтринного телескопа?**

— С идеи, возникшей у М.А. Маркова. А в 1975 г. известные физики Фредерик Райнес, открывший нейтрино, и Джон Лернед с группой коллег попытались реализовать эту идею с помощью проекта, который получил название *DUMAND* (*Deep Underwater Muon and Neutrino Detector*). В рамках проекта предполагалось создание детектора в районе Тихого океана объемом примерно в 1 км^3 . Такой детектор позволил бы увидеть частицы нейтрино, не только рождающиеся в атмосфере Земли космическими лучами, но и приходящие из дальнего космоса. Сформировалась группа ученых, в которую входили М.А. Марков и другие отечественные физики. Однако к концу 1970-х гг. политические события сделали невозможным дальнейшее участие российских ученых. Поэтому американцы продолжили работу над проектом самостоятельно. Он давался им с трудом, а в 1995 г. проект и вовсе был закрыт по причине отсутствия заметного продвижения в создании детектора.

После выхода СССР из проекта необходимо было делать что-то свое. На заседании ученого совета Института ядерных исследований было принято решение создать лабораторию нейтринной астрофизики высоких энергий. Отечественный физик А.Е. Чудаков предложил разрабатывать методику глубоководной регистрации на Байкале. Начав работать, мы постепенно поняли, что нам по силам создавать на Байкале детекторы, способные давать физические результаты и развивать нейтринные исследования. Поэтому уже в 1990-е гг. была сделана первая установка НТ-200. Американцы тоже не останавливались и примерно в то же



время построили установку немного большего размера под названием *AMANDA* на Южном полюсе.

В первые годы работы этих двух детекторов стало понятно, что нейтрино мы регистрируем, но это в основном атмосферные нейтрино. Чтобы увидеть частицы, прилетевшие из дальнего космоса, необходимо делать детекторы существенно большего масштаба.

Чтобы решить эту задачу, коллеги из США реализовали в 2005–2010 гг. проект *IceCube*, а мы в 2015 г. начали работы по созданию детектора *Baikal-GVD*, который и сегодня продолжает наращивать объемы. Наша конечная цель — достичь эффективного объема порядка кубического километра и вести изучение области центра нашей галактики на уровне чувствительности, соизмеримой с детектором *IceCube*.

— Оцените значимость проекта для России: чего уже удалось достичь?

— Анализ данных, собранных на детекторе НТ-200, позволил получить в конце 1990-х — начале 2000-х гг. результаты мирового уровня в задачах исследования диффузного потока нейтрино высоких энергий, поиска магнитных монополей и проявлений частиц темной материи. Детектор дал возможность выполнить широкий круг задач по исследованию потока нейтрино в области сравнительно небольших энергий — гигаэлектронвольт и тераэлектронвольт. И нельзя забывать о развитии методики глубоководной регистрации частиц. С помощью этого детектора были найдены технические решения, позволившие реализовать проект создаваемого сейчас крупномасштабного детектора *Baikal-GVD*.

Поскольку американские коллеги начали работу раньше, уже к 2013 г. они накопили достаточно экспериментальных данных, чтобы выделить первые события из далекого космоса на фоне атмосферных нейтрино. Но на это потребовалось около семи лет набора данных. На сегодня уже собрано порядка 100 подобных событий.

— А сколько уже получено с помощью Байкальского нейтринного телескопа?

— Мы начали на десять лет позже и пока не завершили первый десяток.

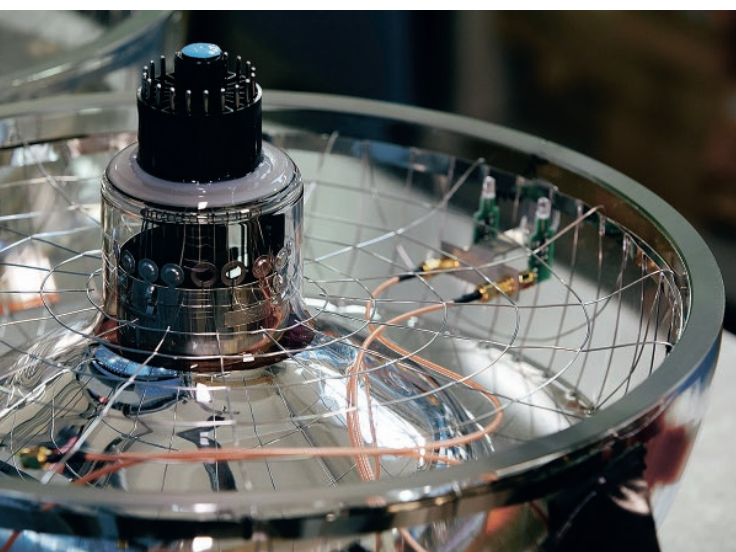
— Среди задач Байкальской нейтринной обсерватории заявлен также поиск новых элементарных частиц. Неужели физики стремятся найти еще больше частиц?

— Вернемся к темной материи. Она, условно, существует. Вопрос в том, из чего она состоит. Есть целый ряд гипотез, которые можно проверять на существующих детекторах.

Помимо этого, физики всего мира ищут магнитные монополи. Существование этой частицы предсказано довольно давно, но пока оно не подтверждается. Ее ищут и на ускорителях, и в экспериментах, регистрирующих космические лучи.

— Обменивается ли американские и российские коллеги данными?

— С большинством ученых мы хорошо знакомы и постоянно делимся данными и опытом. Но, конечно, все самые свежие результаты сначала обрабатываются группой проекта, а затем попадают в открытый доступ. Необходимо отметить, что этим занимаются не только Россия и США. Например, страны Европы создали небольшой детектор в Средиземном море — *ANTARES*.



Оптический модуль Baikal-GVD состоит из глубоководного стеклянного корпуса, фотозлектронного умножителя и блока электроники. При прохождении нейтрино через толщу воды возникает свечение, которое регистрируют фотоумножители. Фото: Б.А. Шайбонов / ОИЯИ.

К сожалению, его возможности не позволяли добраться до нейтрино сверхвысоких энергий из дальнего космоса. Поэтому сейчас они нацелены на создание большого детектора, и мы активно с ними сотрудничаем. Ежегодно научное сообщество проводит совместные конференции, на которых мы делимся результатами.

— **Когда и как вы стали интересоваться тематикой нейтринной астрофизики? Что вас вдохновило?**

— После окончания физического факультета МГУ я пришел в лабораторию нейтрино ФИАН, которой руководили замечательные физики Г.Т. Зацепин и А.Е. Чудаков. Будучи молодыми людьми, мы мало что понимали в нейтринной астрофизике, но было интересно.

Я занимался в основном теоретическими вопросами нейтринной астрофизики малых энергий, а также проблематикой Баксанской нейтринной обсерватории. Нейтринной астрофизикой высоких энергий я занялся по предложению М.А. Маркова спустя 15 лет, в 1980 г., и 1 октября 1980 г. стал заведующим лабораторией нейтринной астрофизики высоких энергий. С тех пор только этим и занимаюсь.

— **Сложно ли было осваивать это направление? Ведь технологии создания нейтринных телескопов в то время были развиты слабо.**

— Освоили потихоньку. Еще в 1980-е гг. мы поняли, что можем создавать глубоководные черенковские детекторы нейтрино. Это и был наш главный результат за первые десять лет работы. К тому же нам



13 марта 2021 г. на Байкале состоялся торжественный запуск крупнейшего в Северном полушарии глубоководного нейтринного телескопа *Vaikal-GVD*. Фото: Б.А. Шайбонов / ОИЯИ.

помогли условия на Байкале: зимой он покрывается льдом, с которого производится монтаж установки.

— **Много ли у вас учеников и последователей? Кто сейчас продолжает ваше дело?**

— Если сравнивать с 1980 г., когда были только я как заведующий лабораторией и первые два-три сотрудника, то сегодня в проекте непосредственно задействованы около 70 человек.

— **Насколько сейчас эта тематика востребована в Институте ядерных исследований и в других институтах? Много ли молодых ученых интересуются этой темой?**

— Сегодня эта тема очень активно и серьезно развивается в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне. Этот институт — наш основной партнер, и мы действительно работаем как единый коллектив. Подобные исследования ведутся и в других институтах, в том числе в МИФИ, ИГУ, и, конечно, в странах Европы.

Важно понимать, что эта деятельность требует большой концентрации усилий серьезных научных коллективов. Например, с установкой *IceCube* работают около 250 человек из разных университетов. Проекты, подобные *IceCube*, — это всегда совокупность блестящих инженерных решений и должного финансирования.

— **Каковы задачи Байкальского нейтринного телескопа? На какие вопросы установка должна найти ответ?**

— Напомню, что масштаб эффекта, обнаруженного *IceCube* (тот самый поток нейтрино из дальнего космоса), — порядка сотни событий. Необходимо собрать больше информации. Важнейшая задача Байкальского нейтринного телескопа — накопить соизмеримый объем информации о доступной для нас (но не для *IceCube* в силу его географического положения) области центра нашей галактики. Скорее всего, на это потребуются около пяти-семи лет работы.

Что мы получим? Во-первых, мы увидим другую часть неба, ту, что скрыта от *IceCube*. Мы подтвердим или опровергнем результаты установки в Антарктиде. Ведь подобные эксперименты всегда должны получать подтверждение. До сих пор *IceCube* работал в полном одиночестве. Теперь к работе подключается Байкальский нейтринный телескоп.

Мы — свидетели эпохи становления многоканальной астрономии (*multi-messenger*

astronomy), эпохи, когда интереснейшие активные объекты Вселенной становятся предметом изучения одновременно с помощью мировой сети инструментов оптической, гамма-, рентгеновской, а теперь и нейтринной астрономии. И Байкальский нейтринный телескоп *Baikal-GVD*, крупнейший детектор Северного полушария, — ключевой элемент создаваемой мировой нейтринной сети наряду с детектором *IceCube* в Антарктиде.

Борис Юрьевич Шарков, академик, вице-директор Объединенного института ядерных исследований в Дубне:

— **Борис Юрьевич, ОИЯИ известен как кузница передовых научных исследований и технологий для экспериментов мирового уровня. Сохраняются ли эти традиции сегодня? И какие проекты вы считаете наиболее значимыми?**

— Объединенный институт ядерных исследований — это уникальная международная и межправительственная организация, единственная в стране с таким статусом. Это дает важные политические и финансовые преимущества для организации научных исследований. В ОИЯИ представлены 18 государств-членов и шесть стран — ассоциированных членов. Это крупнейшие страны Центральной и Восточной Европы, СНГ, Азии и Латинской Америки.

ОИЯИ охватывает широкий спектр научных исследований. Должен сказать, в Дубне сохранились научный дух и научная атмосфера. Конечно, современные веяния в управлении наукой, бюрократизация и другие явления не минули и нас, но мы выстояли, бережно сохранив поистине академический, международный подход к организации научной жизни института.

В ОИЯИ научные исследования на передовом фронте ведутся по целому ряду направлений: физика элементарных частиц, ядерная физика, физика конденсированных сред, радиобиология и современный компьютеринг. По каждому из этих направлений мы занимаем видное место в европейском и международном научном пространстве.

Сегодня институт находится на важном этапе своего развития. В 2020 г. состоялись выборы нового директора. Пришел молодой, очень активный и динамичный человек, который вырос в Дубне и получил здесь



научный опыт, — академик Г.В. Трубников. Напомню, что Григорий Владимирович занимал пост первого заместителя министра науки и высшего образования и вернулся в ОИЯИ с важным для нас багажом управленческого опыта. Естественно, происходит омолаживание управленческих структур института, внедряются современные эффективные способы управления наукой.

Недавно мы приняли стратегию развития института до 2030 г. и далее. Она предусматривает работу по двум ведущим направлениям: первое посвящено научному поиску и приоритетам передовых исследований, а второе затрагивает все многообразие аспектов развития института как международной межправительственной организации, включая вопросы кадровой политики и социальной инфраструктуры.

— **Почему во всем мире сделана ставка на проекты класса мегасайенс?**

— Альберт Эйнштейн говорил: «Жизнь — как вождение велосипеда. Чтобы сохранить равновесие, ты должен двигаться». И сотрудники института точно знают, в каком направлении двигаться. Около десятилетия назад был предложен проект *NICA*, который сегодня находится на завершающей стадии своего создания. Это уникальный ускорительный комплекс мирового класса — мегасайенс-проект.

Почему такие проекты важны? В современной физике крупные проекты, словно магниты, притягивают к себе молодежь, лучшие умы со всего мира и передовые технологии. Все вместе дает потрясающий синергетический эффект. Институт, который осмелился реализовывать мегасайенс-проект, сразу занимает ведущее место не только в собственной стране, но и в мире.



На протяжении двух месяцев в году Байкал покрывается прочным льдом, позволяющим вести монтажные работы. Фото: Б.А. Шайбонов / ОИЯИ.

ОИЯИ следует этой тенденции, активно создавая коллаборации — сообщества ученых, которые хотят работать на новой установке. Активное участие сотен ученых из десятков ведущих институтов и государств — убедительный признак того, что мы делаем правильное дело.

Другой крупный проект известен как «Фабрика сверхтяжелых элементов». Напомню, что именно в Дубне синтезированы сверхтяжелые элементы — дубний, флеровий, оганесон и ряд других. Последний назван в честь академика Ю.Ц. Оганесяна, выдающегося ученого, активно работающего в нашем институте. Исследования обеспечивает уникальный новый циклотрон с огромной производительностью, на котором уже получены интересные научные результаты.

Помимо этого, важные научные направления развиваются с привлечением уникального нейтронного источника — импульсного реактора ИБР-2. Этот реактор, рекордсмен по яркости потока тепловых нейтронов, используется для исследований по нейтронной ядерной физике и физике конденсированных сред. Многие исследовательские реакторы прошлых поколений уже вырабатывают свой ресурс, и проекты закрываются. А потребность в нейтронах в мире для исследований по целому ряду фундаментальных и прикладных задач только растет. Именно поэтому в Дубне создан международный центр коллективного

пользования, который обеспечивает нейтронными потоками 15 экспериментальных станций для фундаментальных и прикладных исследований.

И, конечно, одно из значимых направлений — современный компьютеринг. Наша лаборатория информационных технологий пошла по очень нестандартному пути. Мы не стали гнаться просто за производительностью нашего суперкомпьютера. Вместо этого сотрудники ОИЯИ разработали умную многофункциональную архитектуру на основе прорывных информационных технологий. Она не только обеспечивает все проводимые эксперименты в ОИЯИ, в России и за рубежом (например, в CERN), но и включает рас-

пределенную систему хранения данных — «озеро данных», постоянно расширяет ресурс облачной инфраструктуры.

Созданные технологии неизменно развиваются. Это живая цифровая экосистема, которая растет вслед за развитием IT-индустрии в мире.

— **Расскажите об участии ОИЯИ в создании Байкальского нейтринного телескопа.**

— Начну с того, что нейтрино — удивительная и совершенно неуловимая частица. Нейтринная физика — ключ к современным загадкам физики частиц, космологии и астрофизики, передовой фронт развития науки. Она призвана дать ответы на фундаментальные вопросы о законах Вселенной.

Нейтрино почти не взаимодействует с другими частицами, а значит, достигает Земли, преодолевая огромные расстояния космического масштаба без изменений. Высказываются идеи о будущих каналах связи, основанных именно на модулированных потоках нейтрино.

Современные детекторы сделали очень большой шаг по чувствительности и сегодня способны весьма точно определять типы нейтрино и их источник. Помимо решения фундаментальных вопросов, исследования нейтрино имеют значимый прикладной аспект. Уже сегодня мы можем использовать свойства нейтрино для изучения процесса выгорания топлива внутри

действующего атомного реактора, для анализа явлений, происходящих в недрах Земли. Байкальский нейтринный телескоп представляет собой международный проект — ключевой элемент для создания сети установок для изучения потоков космических нейтрино, крупнейший из детекторов нейтрино в мире наряду с *IceCube* на Южном полюсе и *ANTARES* и *Km³NET* в Средиземном море.

Реализация подобных проектов требует притока творческой молодежи. Мы нуждаемся в креативных молодых людях, которые горят наукой. В ОИЯИ создана образовательная программа, призванная готовить талантливых ребят в рамках летних и зимних школ, тренингов, стажировок и т.д. Речь идет не только о российских студентах: к нам приезжают соискатели из стран — членов ОИЯИ, да и со всех коцов мира. Конечно, пандемия повлияла на этот процесс, но мы надеемся, что приток иностранных молодых ученых продолжится в ближайшее время.

А в 2019 г. нам удалось сформировать новую систему — конкурс на позиции так называемых выдающихся постдоков. Это еще один способ привлечь звезд мировой науки — молодых ученых до 40 лет, которые получили свои *PhD*-степени за рубежом и уже проявили высокие научные и лидерские качества. Институт дает мощную поддержку на уровне европейских стипендий, обеспечивает жильем. Но конкурсный отбор очень серьезный. Конкуренция здесь высока: ведь и другие лаборатории по всему миру борются за молодых и талантливых ученых.

— С какими сложностями столкнулись институт и участники коллаборации во время создания Байкальского нейтринного телескопа?

— Все подобные проекты так или иначе встречаются с проблемами и вызовами. В нашем случае, например, накладываются сезонные ограничения: телескоп можно собирать только зимой, когда Байкал покрывается льдом. Поэтому монтаж установок проходит достаточно медленно.

С другой стороны, ощущается недостаток квалифицированных специалистов. Эта проблема распространена повсеместно и знакома каждому руководителю крупных европейских мегасайенс-проектов.

В современной науке две беды: бюрократия и нехватка кадров. Схватка за профессионалов — самая серьезная. Необходимо предлагать физические задачи

высочайшего класса, достойный уровень заработной платы и соответствующее качество социальной среды, в которой живут и работают ученый и его семья.

Другая проблема, бюрократия, решается благодаря тому, что мы не мешаем ученому работать, а помогаем ему. В ОИЯИ полностью регламентирован процесс закупок и отчетности. Этим занимаются специально подготовленные профессионалы, которые обеспечивают ученых всем необходимым.

— Ожидаете ли вы, что Байкальский нейтринный телескоп привлечет еще больше молодых ребят в науку, в том числе в Дубну и другие институты, участвующие в проекте?

— Бесспорно. И могу сказать, что это уже происходит. После запуска телескопа поток данных стал нарастать, как и уровень интеграции в глобальную астрофизическую сеть, что, конечно, привлекает молодых ученых. Поэтому я не сомневаюсь, что запуск Байкальского нейтринного телескопа вызывает огромный интерес. Кроме того, особым вниманием пользуются биофизика, ИТ, радиобиология и биомедицина — так называемые вечнозеленые направления (как их именовал академик В.Е. Фортов), которые всегда востребованы.

— Какие ключевые векторы современной физики вы бы выделили для молодых людей, которые сейчас учатся на физических факультетах и выбирают сферу деятельности?

— Хочу вновь обратить внимание на направления, которые обеспечивает *NICA*. Здесь и релятивистская ядерная физика, и генерации кварк-глюонной плазмы, критическая точка и фазовый переход адронной материи и многое другое.

Другое интересное и востребованное направление — нейтронное рассеяние, включая нейтронно-активационный анализ, позволяющий с высокой точностью исследовать, например, исторические артефакты: мумии, старинные сосуды, древние предметы и захоронения.

Главный движитель науки — человеческое любопытство. Альберт Эйнштейн призывал не прекращать задавать вопросы и не терять священной любознательности. Поэтому так или иначе все направления пробуждают интерес у молодежи. Мы за этим внимательно следим и всячески стимулируем. ■

Беседовала Анастасия Пензина



СПРОВО- ДИРОВАТЬ, ЧТОБЫ ВЫЛЕЧИТЬ

Почему людей, страдающих болезнями Альцгеймера или Паркинсона, становится все больше? Возможно ли диагностировать эти патологии на ранних стадиях, когда еще не поздно принимать меры? Какие существуют методы терапии нейродегенеративных заболеваний и можно ли научиться полностью их излечивать? Что зависит от врачей и ученых, а что — от нас самих? Об этом — наш разговор с академиком Михаилом Вениаминовичем Угрюмовым, заведующим лабораторией нервных и нейроэндокринных регуляций Института биологии развития им. Н.К. Кольцова РАН.



Академик М.В. Угрюмов

— **Михаил Вениаминович, мы находимся в одном из помещений вашей лаборатории, где проходят эксперименты по наблюдению за поведением животных. Мы видим некоторых из этих животных сейчас — по-моему, им очень любопытно и они тоже наблюдают за нами.**

— Вполне возможно. В нашей лаборатории два основных направления. Первое — мы занимаемся нейродегенеративными заболеваниями, в основном болезнью Паркинсона, хотя в круг наших интересов входит также и болезнь Альцгеймера. Сейчас не только врачи, но и политики говорят о том, что борьба с нейродегенеративными заболеваниями — один из глобальных вызовов XXI в. Объяснение простое: эти заболевания до сих пор не лечатся, но требуют очень больших финансовых вложений государства. Рано или поздно они приводят к тяжелой инвалидизации. Это, конечно, большая нагрузка не только на больных, но и на их близких, и на государство.

— **Академик А.С. Тиганов из Научного центра психического здоровья говорил мне, что болезнь Альцгеймера приобретает характер эпидемии. Так ли это?**

— Я вполне согласен с моим покойным другом. Число таких больных растет почти в геометрической прогрессии. За 10–15 лет прогнозируется увеличение количества страдающих этим недугом в два-три раза. Тому может быть множество причин, и большинство из них нам неизвестны. Но две причины мы знаем. Первая — повышается продолжительность жизни людей, что, как ни парадоксально, стало бичом для развитых стран, поскольку при этом быстро увеличивается число больных.

Вторая — эти болезни вызываются вредными факторами внешней среды. Так, производство с тяжелыми металлами, применение пестицидов и ряда других удобрений в сельском хозяйстве провоцируют возникновение таких заболеваний. В странах, которые быстро развиваются индустриально и не успевают создавать очистные сооружения, очень высокий процент заболеваемости. В этом отношении показателен Китай, где мы наблюдаем невероятно бурный рост промышленности и распространения болезни Паркинсона. И если раньше симптоматика проявлялась не раньше 50 лет, обычно после 60, то сейчас это может происходить гораздо раньше.

— **Как выглядит наша страна на этом фоне?**

— Так же, как и другие страны. У нас примерно 1,5 млн пациентов с болезнью Альцгеймера и примерно 300–500 тыс. — с болезнью Паркинсона. Но я не исключаю, что случаев может быть гораздо больше, по-

скольку у нас гораздо хуже, чем во многих развитых странах, поставлена диагностика. Это относится в первую очередь к удаленным от мегаполисов регионам. Скажем, в сельской местности возможности нашего здравоохранения крайне ограничены, что не может не отражаться на диагностировании и лечении больных. Поэтому, думаю, мы не имеем адекватных статистических данных по стране.

— **Насколько я понимаю, чем раньше диагностировать нейродегенеративное заболевание, тем больше шансов помочь пациенту.**

— Это абсолютно верно. В настоящее время мы знаем совершенно точно, что специфическая симптоматика нейродегенеративных заболеваний, следовательно, и возможность их диагностирования появляются только через десятки лет после начала болезни. Однако все это время идет постепенное разрушение мозга, и когда проявляются специфические симптомы, мозг уже настолько разрушен, что многие его функции необратимо утеряны. Поэтому любая терапия, которая начинается после, не может быть эффективной. Отсюда следует логичный вывод: нужно постараться поставить диагноз как можно раньше, когда ни врач, ни даже больной не догадываются, что болезнь уже началась.

— **Как же можно это осуществить? Всем поголовно после 20 лет делать МРТ головного мозга?**

— Это возможно сделать, используя такой метод, как позитронно-эмиссионная томография со специфическими лигандами — ключами к функциональным молекулам, которые страдают у больного. К сожалению, у нас в стране таких лигандов нет, а привозить их из-за границы невозможно,

поскольку они работают только в течение короткого времени после синтеза. Это большой минус в нашей работе. Хотя метод позитронно-эмиссионной томографии с использованием специфических лигандов не уникален в развитых странах, его никогда нельзя будет использовать для диспансеризации, поскольку это высокочувствительный метод, к тому же требующий особых технических условий. Я подчеркиваю, что даже США — одна из богатейших стран с очень обширной сетью ПЭТ-КТ — никогда не смогут себе этого позволить. Поэтому сейчас ищут такие подходы, которые легко воспроизводимы, не вредны для человека и позволят с большой вероятностью определить, что болезнь развивается без проявления специфических симптомов.

— Значит, все же человек попадает на такое исследование с какими-то симптомами?

— Однозначных клинических предвестников пока не выявлено, но поскольку патологические процессы начинаются рано, они со временем захватывают не только отделы мозга, ответственные за регуляцию страдающих функций, например nigrostriatную систему, играющую ключевую роль в регуляции двигательной функции, но и многие другие отделы мозга. При этом изменяется метаболизм как в нервной системе, так и во внутренних органах. В свою очередь, это проявляется в виде изменений в составе крови и ликвора, которые рассматриваются как биомаркеры начальных патологических процессов.

— На какие тревожные признаки надо обратить внимание, чтобы не упустить болезнь?

— Если говорить о болезнях Альцгеймера и Паркинсона, то одно из самых ранних клинических проявлений обоих заболеваний — это не потеря памяти и не нарушение двигательной функции, как принято считать. Это нарушение обоняния, как при COVID-19. Но, хотя это характерно для нейродегенеративных заболеваний, данный признак нельзя считать специфическим. Действительно, нарушение обоняния наблюдается и при многих других заболеваниях.

— У многих людей, переболевших COVID-19 и утративших обоняние, впоследствии развиваются когнитивные нарушения. Связаны ли эти два процесса?

— Да, могут быть связаны, поскольку оба нарушения — результат локальных воспалительных процессов, провоцирующих гибель нейронов. Скорее всего, потеря обоняния связана с тем, что повреждаются нейроны, находящиеся в роstralной части мозга — так называемых обонятельных луковицах. Оттуда нервы идут как раз в область слизистой носовой полости. Очевидно, при болезни Альцгеймера или при болезни Паркинсона, как и при коронавирусной инфекции, страдают именно эти нейроны.

Если мы имеем дело с болезнью Паркинсона, то на раннем этапе также часто нарушается сон, причем определенным образом: человек во сне начинает вести себя очень бурно, иногда даже агрессивно — дергается, крутит головой, разбрасывает подушки, как будто с кем-то сражается.

— То есть если просто не спится, это не болезнь Паркинсона? Вы меня успокоили.

— Да, именно так. Есть и многие другие возможные клинические предвестники нейродегенеративных заболеваний. Так, при болезни Паркинсона наблюдаются запоры, что объясняется нарушением нервной регуляции кишечника и снижением способности к перистальтике. Сейчас мы с нашими коллегами-неврологами по наличию клинических предвестников отбираем людей в группу риска, чтобы искать у них биомаркеры в виде изменения в биологических жидкостях. Кстати, их можно искать не только в крови, но и в слезной жидкости, состав которой у таких потенциальных больных тоже должен меняться.

— А что происходит со слезами?

— В слезной жидкости у больных в первую очередь изменяется состав белков, особенно тех, которые связаны с механизмом нейродегенерации. Скажем, при болезни Альцгеймера это бета-амилоид, а при болезни Паркинсона — агрегированный альфа-синуклеин. При патологии изменяется метаболизм и они превращаются в нейротоксины. При болезни Паркинсона большое значение имеет и то, что погибают нейроны, вырабатывающие катехоламины, главный из которых — дофамин. Это также отражается в составе слезы.

Сейчас мы готовим большую статью на эту тему, написанную по результатам двухлетней совместной работы с неврологами и офтальмологами. В слезе у больных мы уже нашли ряд диагностических биомаркеров. Складывается впечатление, что



Выделение из мозга животного области, страдающей при болезни Паркинсона, для последующего молекулярно-биологического исследования



Автоматизированное исследование моторного поведения животных с фармакологически индуцированным паркинсонизмом

биомаркеры в слезе с диагностической точки зрения имеют даже бóльшую ценность, чем в крови.

— Вы сотрудничаете с какими-то медицинскими организациями?

— Безусловно. Сейчас появилась уникальная возможность реализовать не на словах, а на деле принципы так называемой трансляционной медицины. Это стало возможным благодаря тому, что у нас появились инструменты для изучения молекулярных механизмов в патологических процессах. Мы точно знаем, какая молекула страдает в определенной клетке при том или ином заболевании, что с ней происходит, и, отталкиваясь от этого, можем построить диагностику и лечение. Вся фундаментальная часть делается в этом институте, но, поскольку нам необходимы для исследований биологические образцы человеческого организма, мы с удовольствием сотрудничаем с ведущими неврологическими клиниками.

Десять лет назад я создал прикладную структуру — ООО «Центр ранней диагностики нейродегенеративных заболеваний», резидент ИЦ «Сколково», который, так же как и моя лаборатория в Институте биологии развития им. Н.К. Кольцова РАН, сотрудничает с такими ведущими медицинскими структурами, как клиника неврологии РНИМУ им. Н.И. Пирогова, которой руководит академик

Е.И. Гусев, клиника неврологии Первого МГМУ им. И.М. Сеченова во главе с академиком Н.Н. Яхно, а также Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней им. Гельмгольца. Именно в этих организациях по решению локальных этических комитетов и при информированном согласии пациентов мы получаем образцы крови и слезной жидкости для анализа.

— Но достаточно ли для диагностики таких состояний анализ биологических жидкостей?

— К сожалению, нет. Диагностика по маркерам биологических жидкостей останется относительно специфичной, то есть она будет лишь с какой-то вероятностью помогать поставить диагноз.

— А позитронно-эмиссионная томография, как вы сами говорите, — очень дорогой и мало для кого доступный метод диагностики. Нельзя ли придумать что-то еще, дешевое и эффективное?

— Вот это самый главный вопрос. Ответ на него — да, мы смогли впервые создать такую технологию! Дело в том, что все хронические заболевания мозга и внутренних органов развиваются по общему сценарию. Они тянутся многие годы без всяких проявлений. Когда проявляется симптоматика и ставят диагноз, обычно лечить уже поздно или малоэффективно. Поэтому в терапии уже десятки лет успешно используют способ ранней диагностики хронических заболеваний внутренних органов с помощью так называемого провокационного теста.

Во время этого теста кратковременно усиливают функциональную недостаточность какого-либо органа или системы органов до порога, при котором у людей в латентной фазе заболевания обратимо проявятся характерные симптомы. У здоровых людей такое же воздействие не проявляется никак. Один из наиболее известных примеров использования провокационного теста — велоэргометрия, с помощью которой диагностируют сердечную недостаточность. В этом случае человека сажают на лабораторный велосипед и регистрируют работу сердца с помощью ЭКГ. Здоровый человек может крутить педали долго, а больной через какое-то время начинает задыхаться, что определенным образом регистрируется и на ЭКГ. Это и есть пример диагностики хронического заболевания в латентной фазе с помощью провокационного теста, в данном случае в виде физической нагрузки. Помимо этого в качестве провокационного теста широко используют фармакологические тесты, особенно для диагностики эндокринных заболеваний.

— Каким образом можно воссоздать провокационный тест в неврологии?

— Как ни странно, провокационные тесты до сих пор никогда не использовались в неврологии и психиатрии для диагностики хронических

заболеваний. Нами впервые разработана такая диагностика применительно к болезни Паркинсона. В течение последних лет были проведены необходимые исследования на животных, и сейчас планируются клинические испытания на людях. Созданную нами на примере болезни Паркинсона методологию разработки ранней диагностики можно распространить на все нейродегенеративные заболевания, в основе которых лежат гибель специфических нейронов и возникающий при этом дефицит определенных нейротрансмиттеров. Так, ведущее звено патогенеза болезни Паркинсона — гибель дофаминергических нейронов,

сосредоточенных в nigrostriatalной системе мозга, и возникающий при этом дефицит дофамина в стриатуме. Именно дофамин выступает ключевым нейротрансмиттером, ответственным за регуляцию двигательной функции. Уровень дофамина должен снизиться до порога — на 70%, чтобы появились нарушения двигательной функции, характерные для болезни Паркинсона.

На основе проведенных нами экспериментальных исследований уже сейчас понятно, как должен выглядеть провокационный тест при диагностике болезни Паркинсона. Для этого должен быть использован ингибитор синтеза дофамина, причем в той дозе, в которой он у больных в латентной фазе снизит уровень дофамина в стриатуме до порога, при котором временно проявятся нарушения двигательной функции. Введение ингибитора синтеза дофамина в такой же дозе здоровым людям хотя и приведет к снижению его уровня в стриатуме, но не до проблем с двигательной функцией. Другими словами, внешне действие ингибитора никак не проявится.

— Не вреден ли ингибитор, который вы вводите своим моделям?

— Очень важный вопрос, ведь первая заповедь медика — не навреди. Есть все основания считать, что ингибитор, который мы предложили,

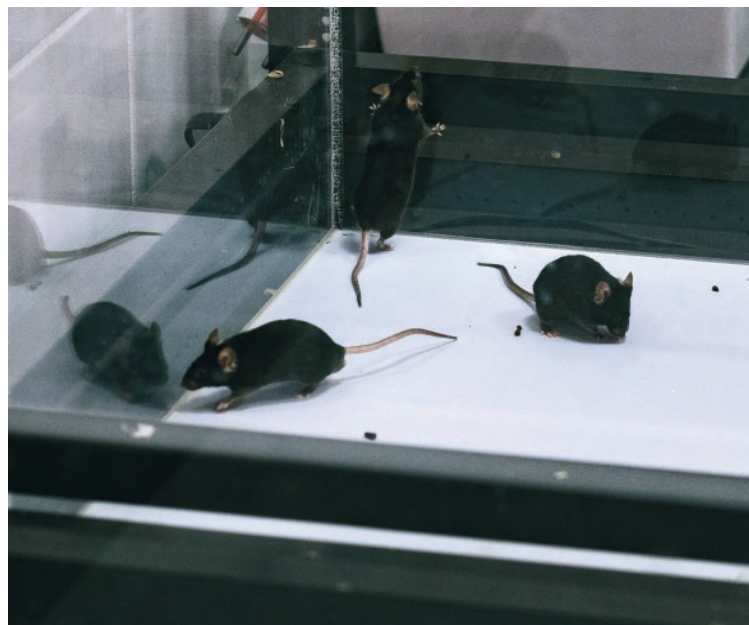
абсолютно безвреден. Во-первых, доказано, что используемый нами ингибитор синтеза дофамина, альфа-метил-п-тирозин, — обратимый и неметаболизируемый. Это означает, что он оказывает кратковременное действие и после этого выводится из организма в неизменном виде. Во-вторых, альфа-метил-п-тирозин постоянно используют при системном введении для изучения

молекулярных механизмов дофаминергической нейротрансмиссии с помощью позитронно-эмиссионной томографии у здоровых людей. И, наконец, в-третьих, альфа-метил-п-тирозин давно успешно применяют при терапии ряда хронических заболе-

ваний, таких как злокачественная феохромоцитома и шизофрения. Безусловно, его использованию для лечения людей предшествовали стандартные клинические исследования, доказавшие его безвредность.

Сейчас мы переходим к заключительной стадии поэтапного доказательства эффективности разработанного нами провокационного теста для ранней, доклинической диагностики. На первом этапе среди внешне здоровых людей будет подобрана группа развития этого заболевания в латентной фазе по наличию клинических предвестников болезни Паркинсона и маркеров в крови и в слезе. На втором этапе среди испытуемых

Учить иностранные языки, стихи, все что угодно. Важно активное общение. Это и есть когнитивный тренинг



Лабораторные животные, помогающие найти средства для борьбы с нейродегенеративными заболеваниями

в группе риска будут отобраны те, у которых возникли кратковременные двигательные нарушения при введении заранее рассчитанной дозы ингибитора синтеза дофамина. На последнем этапе с помощью ПЭТ предполагается получить доказательства того, что у испытуемых, ответивших положительно на провокационный тест, наблюдается функциональная недостаточность nigrostriатной дофаминергической системы. Надеемся, в обозримом будущем диагностирование болезни Паркинсона с помощью провокационного теста станет рутинной практикой. Так, человек, проходящий диспансеризацию в поликлинике, будет принимать под контролем невролога пилюлю с ингибитором синтеза дофамина, а через несколько часов станет ясно, развивается ли у него болезнь Паркинсона.

При разработке любой медицинской технологии необходимо отдавать себе отчет, в какой степени и кем она может быть востребована. Мы надеемся, что со временем провокационный тест будет широко использоваться при диспансеризации населения как эффективная и малозатратная технология. В этом контексте особенно большое значение имеет профилактическое обследование людей, которых отбирают и готовят к работе в экстремальных условиях, — спортсменов, космонавтов, подводников, а также тех, кто пожизненно занимает определенные ответственные должности, например некоторые категории судей.

— Михаил Вениаминович, допустим, мы дожили до светлого дня, когда человек приходит на диспансеризацию в свою районную поликлинику, где ему проводят такой тест и говорят: «Высока вероятность того, что у вас развивается болезнь Паркинсона, которая клинически проявится в ближайшие десять лет». Что дальше?

— А дальше самое главное. Параллельно с ранней диагностикой необходимо разработать и превентивное лечение. Оно должно принципиально отличаться от существующего симптоматического лечения больного на поздней стадии заболевания после появления моторной симптоматики. Если на поздней стадии необходимо компенсировать дефицит дофамина, возникший в результате дегенерации большей части дофаминергических нейронов, то на ранней стадии при отсутствии дефицита дофамина необходимо максимально замедлить гибель нейронов. Для этого в основном будут использованы уже известные лекарственные средства — антиоксиданты, противовоспалительные, антиапоптотические, ростовые факторы, способствующие выживанию нейронов. Проблема в том, что пока ни у кого нет опыта использования этих лекарств на ранней стадии болезни Паркинсона. Поэтому мы уже начали разрабатывать на экспериментальных моделях схему

лечения — определяем, в какой дозе, в каких комбинациях и с какими интервалами нужно использовать нейропротекторы с различными механизмами действия. Надеемся, что с помощью превентивного лечения удастся не только замедлить гибель нейронов, но и продлить неограниченно долго бессимптомную стадию заболевания, а следовательно, и период активной физической и социальной жизни.

— Как себя чувствуют модели? Они лишились всех признаков нейродегенеративных заболеваний?

— Мы получили однозначно позитивные результаты на моделях, что позволяет перейти к клиническим испытаниям на людях. Наши проекты были поддержаны Министерством науки и высшего образования РФ по специальной программе «Фарма-2020». Сейчас мы продолжаем эти исследования при поддержке фонда «Сколково». Что касается разработки нейропротекторной терапии, эти исследования только недавно начались и подводить итоги пока рановато. Тем не менее уже проводится скрининг лекарственных средств с нейропротекторными свойствами на клеточных и животных моделях.

— Есть ли у вас какие-то универсальные советы для людей, которые хотят избежать нейродегенеративных заболеваний?

— Безусловно, есть. Они основаны на принципах профилактической медицины, которая пропагандировалась еще Гиппократом. Основной принцип — поймать заболевание на самой ранней стадии и начать профилактическое лечение. Важно понимать, что функция теряется, если мы ее не упражняем. Так, например, получены убедительные доказательства того, что даже при возникновении болезни Альцгеймера ее развитие можно существенно замедлить когнитивным тренингом.

— Что конкретно нужно делать?

— Учить иностранные языки, стихи, все что угодно. Важно активное общение. Это и есть когнитивный тренинг. Если речь идет о болезни Паркинсона, когда нарушается двигательная функция, то профилактика — регулярные физические упражнения. Считается, что это предотвращает возникновение болезни Паркинсона или по крайней мере замедляет ее прогрессирование.

В чем принципиальное преимущество этого подхода перед традиционной фармакотерапией? В том, что вы ничего не вводите в организм. Какое бы хорошее лекарство ни было, оно неизбежно оказывает побочное действие и имеет определенные противопоказания. В случае когнитивного и физического тренинга мы ничем не рискуем, ничего не теряем, зато многое приобретаем. ■

Беседовала Наталья Лескова

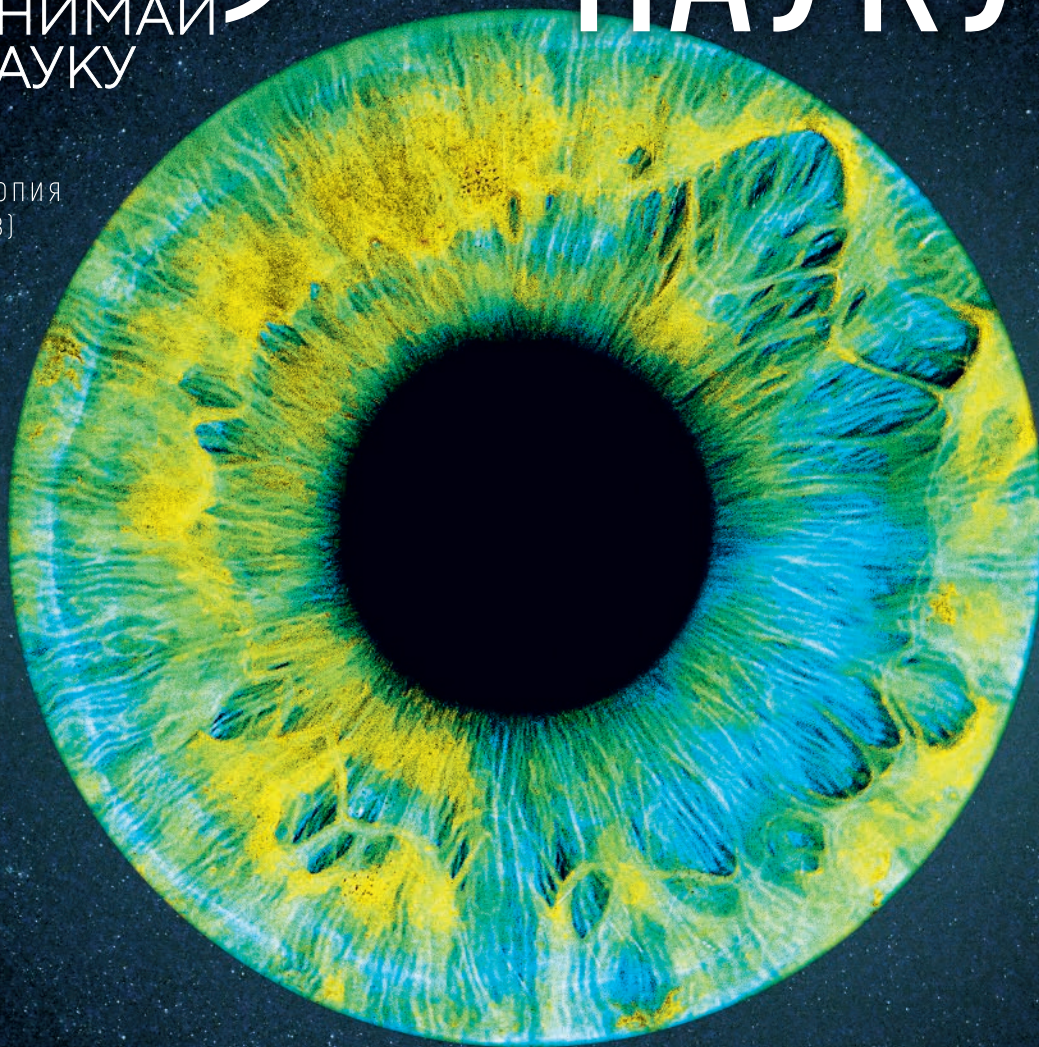


СНИМАЙ
НАУКУ

ФОТО И ВИДЕО КОНКУРС

СНИМАЙ НАУКУ

МИКРОСКОПИЯ
IRIS (ГЛАЗ)



ПОДРОБНОСТИ НА САЙТЕ NAUKATV.RU

- СПЕЦНОМИНАЦИЯ «КОСМОС»
- ВЫИГРЫВАЙ ЦЕННЫЕ ПРИЗЫ
- ЛУЧШИЕ ФОТОРАБОТЫ ПРОИЛЛЮСТРИРУЮТ СТАТЬИ ВИКИМЕДИИ
- АВТОР САМОЙ УДАЧНОЙ ВИДЕОРАБОТЫ ПОЛУЧИТ ШАНС СТАТЬ ВЕДУЩИМ НА КАНАЛЕ

12+
реклама



ПОЗНАНИЕ



МОЯ ПЛАНЕТА
телеканал



КАНАЛ
НАУКА



ЖИВАЯ ПЛАНЕТА
телеканал



ИСТОРИЯ
телеканал



ТЕЛЕКАНАЛ



ТЕЛЕКАНАЛ



МЫСЛЯЩАЯ ГИПЕРСЕТЬ

*«Я знаю себя как мысль, но я,
безусловно, не знаю себя как мозг».*

Рене Декарт

У XXI в. есть все шансы войти в историю революционными открытиями в области изучения человеческого мозга. Ученые надеются, что вскоре наука о мозге сможет приподнять завесу тайны над природой разума и сознания.

Директор Института перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносова академик **Константин Владимирович Анохин** считает, что для этого необходима фундаментальная теория мозга, которая должна ответить на три главных вопроса: как устроено наше «я», как оно складывается и как работает. Лишь тогда мы поймем, кто мы такие, откуда мы пришли и куда мы движемся.



Академик К.В. Анохин

— Константин Владимирович, что делает наш мозг мыслящим?

— То, что в нем сконцентрированы мы сами. Это короткий ответ. Развернутый ответ дает гиперсетевая теория мозга, адресующаяся к его сущности, его отличию от других органов нашего тела.

Чтобы короткий ответ не выглядел банальным, обратите внимание: я не сказал, что наш мозг и есть мы. Я сказал, что мы сосредоточены в нашем мозге. Как такое может быть — чтобы одновременно «мы» и «в нашем мозге»? Это кажется явным парадоксом. Тем не менее, говоря о рождении или смерти человека, мы действительно имеем в виду весь организм, однако появившись операции по трансплантации мозга — и мы будем думать о своем перемещении в новое тело вместе с пересаживаемым мозгом. Понять такое расположение научных фактов, при котором эти обстоятельства не образуют парадокс, есть первый шаг к разгадке великой тайны мозга.

Эта тайна веками привлекала исследователей человеческой природы. Как-то знакомый знаменитого французского философа и математика Рене Декарта спросил его, какие книги по физике тот предпочитает. В ответ Декарт провел его в пристройку своего дома, где на столах лежали тела вскрытых им животных, и сказал: «Вот мои лучшие книги». Декарт стремился узнать, где и как душа вступает в контакт с мозгом. Некоторые из гипотез и схем были опубликованы в его трудах. Но свои самые сокровенные идеи Декарт заносил при помощи тайного кода в секретную тетрадь. Через 16 лет после его смерти в дверь старого друга, хранившего его труды, постучал молодой ганноверский дипломат, умолявший о возможности увидеть тайные записи. Этим молодым человеком был будущий великий немецкий философ и математик Готфрид Лейбниц. Он страстно искал ответ

на тот же вопрос, что и Декарт. Душеприказчик Декарта с большой неохотой дал Лейбницу коротко взглянуть на секретную тетрадь, и тому удалось поспешно скопировать всего полторы ее страницы. Вскоре тайная тетрадь Декарта исчезла навсегда, и эти полторы страницы, скопированные Лейбницем, есть все, что мы о ней знаем. На одном из этих листков Декарт зарисовал мозг, обозначив некоторые его структуры и выделив жирным контуром гипоталамус.

Позже Лейбниц разработал собственную теорию соотношения души и тела, согласно которой мир образован внепространственными единицами бытия — монадами, которые, по его словам, следует воспринимать наподобие душ. Частью его аргументации была знаменитая «мельница Лейбница» — возражение про-

тив механического материализма, того, что наши мысли и чувства возникают во взаимодействиях частей мозга как шестерен сложной машины. Однако другой великий философ, шотландец Дэвид Юм, вскоре уже уверенно описывал мышление как «незначительные колебания мозга».

Философские поиски соотношения разума и мозга продолжают по сей день. Но основной смысл сегодняшнего момента в том, что решением этой проблемы занялась новая наука о мозге. Почему именно сегодня и почему новая? Дело в том, что долгое время думающий мозг не был прозрачен для нейронаучных исследований. Наука не располагала надежными способами подсмотреть, как миллионы нервных клеток взаимодействуют друг с другом в ходе психической деятельности. А главные тайны мозга записаны на языке общения таких ансамблей из индивидуальных нейронов. Сегодня в нейронауке начинают появляться методы изучения этого языка. Мы уже можем исследовать живой бодрствующий мозг животного, а иногда и человека, видя, как тысячи его нейронов объединяются в сообщества, рождающие мысли, чувства, поведение. И я убежден, что время разгадки сокровенных секретов мозга уже наступило. За чередой великих открытий в географии, физике, химии, биологии пришло время понять, как клетки нашего мозга образуют наше «я».

Конечно, мы не можем быть полностью уверены, что наших сегодняшних знаний и методов достаточно. Но, как сказал один замечательный физик, единственный способ понять, как высоко мы можем взлететь, — это стремиться ввысь до тех пор, пока солнце не растопит воск на наших крыльях. Я лично готов поставить на то, что в летописи науки наш век запомнится именно раскрытием фундаментальной природы разума и сознания. Но чтобы это произошло, потребует радикально изменить

наши представления о самой сущности мозга. Гиперсетевая теория мозга пытается сделать именно это.

— В чем суть этой теории?

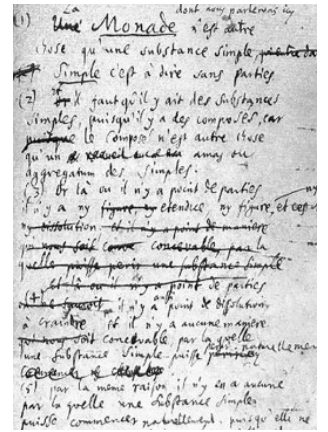
— Теория позволяет понять мозг на принципиально новом уровне. Веками было принято рассматривать мозг в ряду других органов нашего тела — сердца, печени, почек. Нейронаука и сегодня описывает его лишь как сложную клеточную сеть из мириад нейронных и глиальных элементов. Гиперсетевая теория мозга говорит, что такой взгляд фундаментально неверен. Она утверждает, что истинную природу мозга можно понять, лишь исходя из принципа максимального существования. Согласно этому принципу, сущность любого объекта определяется его максимальной причинно-действенной силой — наивысшей способностью вступать во взаимодействия с другими объектами мира, испытывать такие воздействия и самому как целому воздействовать на мир. Как объяснял Платон устами элейского незнакомца в одном из своих знаменитых диалогов «Софист», суть бытия — в способности воздействовать и испытывать воздействия; существование есть не что иное, как эта способность, сила. Гиперсетевая теория мозга утверждает, что максимальная причинно-действенная сила мозга вовсе не в его физиологических потенциях, как у всех других органов тела; она в действительном соотношении своего носителя, всего организма со сложным предметным миром — сначала с окружающим внешним миром, а затем и с развивающимся на основе этих взаимодействий миром внутренним. Иными словами, согласно теории, мозг на максимальном уровне своего причинно-действенного потенциала представляет собой разум, то, что Декарт обозначил как *res cogitans* — мыслящую субстанцию.

Это основополагающий тезис теории, ее центральное тождество. Но если ограничиться только им, мы получим уже известную теорию тождества разума и мозга, вариантов которой в истории было множество. Молодой И.М. Сеченов писал



Leibniz

Готфрид Вильгельм Лейбниц (1596–1650); страница рукописи его книги, вводящей концепцию монад



об этом в своем эссе «Попытка свести способ происхождения психических явлений на физиологические основы», более известном как «Рефлексы головного мозга», — книге, названной И.П. Павловым «гениальным взмахом русской научной мысли». Сам И.П. Павлов мечтал о том, что «осуществится естественное и неизбежное сближение и, наконец, слитие психологического с физиологическим, субъективного с объективным». В западной аналитической философии второй половины прошлого века это решение распространилось как научный материализм или теория тождества. Десятки именитых ученых и философов придерживались этой точки зрения.

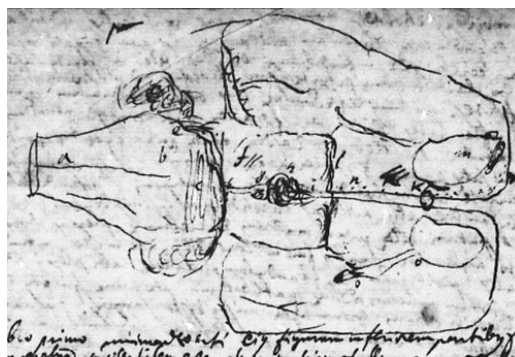
Общим для всех этих решений было то, что они отождествляли разум с традиционной анатомией мозга — нервной сетью, а психику — с физиологическими процессами в этой нервной сети. Иными словами, они сводили психику к устройству и работе физиологического органа.

Гиперсетевая теория мозга говорит, что неверным в этих взглядах была не сама идея тождества, а то, с чем именно разум отождествлялся. Основная суть теории состоит в том, что она вводит представление об особой сущностной организации мозга — нейронной гиперсети. Согласно теории, максимальная причинно-действенная сила мозга — психика — воплощена именно в этой структуре. Теория описывает устройство этой нервной структуры, принципы ее возникновения и функционирования.

Нейронная гиперсеть таит в себе все, что составляет нас: все атомы нашего «я», нашей личности, наши представления, знания, воспоминания, организованные в сеть. Каждый



Descartes



Рене Декарт (1596–1650); рисунок мозга, скопированный Лейбницем из тайной тетради Декарта

из ее элементов — в теории они называются когами (КОгнитивными Группами) — закодирован в мозге распределенной сетью нейронов. В части из своих нейронов эти группы перекрываются, создавая таким образом связи. В теории такие связующие компоненты когнитивных групп называются лигами (Линкерами Групп). А вместе коги и лиги образуют сеть из многих нейронных сетей — нейронную гиперсеть. Для обозначения этой когнитивной гиперсети в теории используется понятие «когнитом».

Важно подчеркнуть, что хотя элементы когнитома, узлы и связи в гиперсети материально представляют собой группы нервных клеток, по своим свойствам, то есть причинно-действенному потенциалу, они несводимы к ним, так же как белки по своим свойствам несводимы к составляющим их аминокислотам. Узлы в нейронной гиперсети обладают фундаментально новыми свойствами, они представляют собой гранулы когнитивной информации, нашего знания о мире.

Отвечая на ваш исходный вопрос, можно сказать: процессы, которые протекают в такой гиперсети, и делают наш мозг мыслящим. Мышление — это трафик в нейронной гиперсети разума.

Нейронная гиперсеть закладывается уже в эмбриональный период, когда формируется нервная система. Ребенок рождается с зачатками этой когнитивной сети, еще простой, но уже подготовленной миллионами лет эволюции к тому, с чем встретится организм. Он уже что-то знает, для него окружающий мир — не просто неразмеченное пространство. В нем есть определенные сущности и ценности: тепло, молоко, голос матери (который, как мы знаем, ребенок учится распознавать еще в утробе); они составляют начальный остов когнитивной гиперсети, личности.

В отличие от нейронной сети в мозге, почти не образующей новые элементы после рождения, нейронная гиперсеть, наш разум, наше «я» в детстве растет огромными темпами. И продолжает

прирастать и дальше, во взрослом возрасте, и так до самой смерти. В какое-то время в ней начинаются процессы старения и разрушения, что и составляет распад личности, особенно тяжелый в случае нейродегенеративных заболеваний.

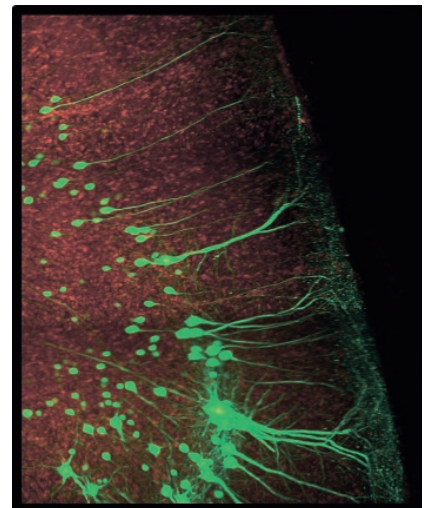
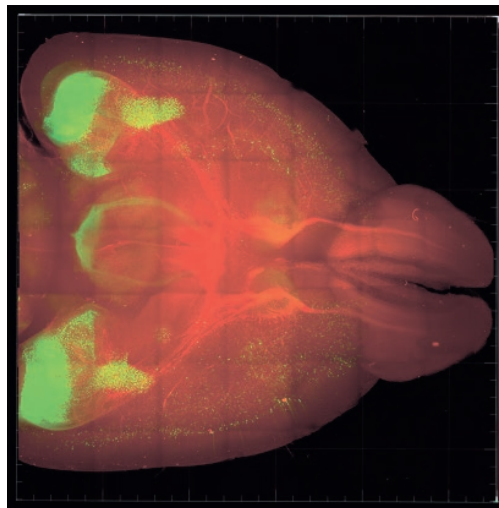
Грандиозная задача науки о мозге — понять принципы устройства этого когнитивного пространства, его роста, процессов, происходящих в нем. И я думаю, что базовые законы окажутся очень простыми. Мы или наши потомки, которые будут знать эти законы, возможно, удивятся их простоте, как и немногочисленности законов ньютоновской механики или дарвиновского естественного отбора.

Таким образом, наш мозг — это одновременно и разум, то, что делает нас уникальными личностями. Однако чтобы понять это, нужна эффективная теория. Нейрохирург и богослов В.Ф. Войно-Ясенецкий как-то сказал: «Я много оперировал на мозге и, открывая черепную коробку, никогда не видел там ума». Ответом ему могут служить слова Альберта Эйнштейна: «Лишь теория решает, что мы ухитряемся наблюдать». Только теоретически вооруженный взгляд может понять то сложнейшее устройство природы, которое образует наше «я», наш разум, нашу психику. И у меня есть глубокое убеждение, что исторический момент создания такой фундаментальной теории наступил сейчас.

— Почему природа наделила именно этот орган такими возможностями, таким сложным устройством?

— Потому что именно нервная система оказалась способна интегрировать информацию во всем теле, в том числе и от рецептивных границ с внешним миром, и поднимать эту информацию на уровень смыслов существования для целого организма. Первое — принципиальная особенность нейронной сети, второе — фундаментальное и нередуцируемое свойство нейронной гиперсети.

Современная визуализация мозга в проекции, зарисованной Рене Декартом: мозг трансгенной мыши *Thy1-EGFP* (препарат О.И. Ефимовой) с нейронами, маркированными зеленым флуоресцентным белком, был оптически просветлен и визуализирован методом лазерной плосколучевой микроскопии



Почему нейронная сеть и ее гиперсеть возникли именно как свойства мозга? Как сказал один из создателей молекулярной биологии Жак Моно, природа — перелицовщик, она пользуется тем материалом, который у нее под рукой. Когда в очень примитивных организмах клетки, выделяющие химические вещества, начали вступать друг с другом в контакт, появилась возможность адресной доставки этих веществ по всему телу. Оказалось, что этот инструмент позволяет, хотя и медленно, интегрировать тело, состоящее из большого количества элементов. Возможность сделать это быстро возникла с появлением механизмов распространения в этой сети импульсных сигналов, что позволило ее носителям оперативно координировать свое поведение в отношении окружающего мира и категоризовать этот мир в терминах своих потребностей.

Мы знаем, что разные организмы, эволюционировавшие независимыми путями, обладают очень непохожими нервными системами. Нервная система улитки не похожа на нервную систему мухи, нервная система мухи не похожа на нервную систему осьминога, нервная система осьминога не похожа на нервную систему ящерицы, а та мало похожа на нервную систему человека. Но если подойти с позиции общих принципов, теории графов, математических закономерностей их организации (и это делается сегодня в науке о мозге), то эти нервные сети, несмотря на их внешнее несходство, демонстрируют уникальный общий способ организации, отличающийся и от случайных сетей, в которых все связано со всем, и от регулярных сетей, где одно цепляется за другое, как решетка. Элементы нервной системы тесно контактируют со своими ближайшими соседями, но часть этих нейронов отдают адресный сигнал в совершенно другую часть большой сети, и та моментально его получает, а далее у нее тоже есть свои локальные процессы. Это позволяет большой сети жить единой жизнью, пользуясь всеми выгодами локальной обработки информации, которая происходит в каждом из участков системы. Что в эволюции стало драйвером выработки таких общих принципов организации на фоне столь различного исходного материала? Гиперсетевая теория мозга говорит, что за фасадом этого процесса стоят кооперативные группы нейронов и их взаимодействия, решавшие задачу когнитивной адаптации живых существ к проблемному внешнему миру.

— **Когда мы читаем произведения, например, Платона, жившего в V–IV вв. до н.э., мы видим, что мозг у него при отсутствии тех знаний, которые есть у современного человека, был развит не меньше, а может быть и больше, чем у многих современных людей, перед которыми море информации. О чем это говорит?**

— Как я уже сказал, за тем, что мы ранее видели как нервную сеть, скрывается сформированная на ее основе гиперсеть. Но это значит, что вы можете иметь два внешне одинаковых мозга, которые не будут отличаться с точки зрения их веса, количества нервных клеток, числа связей между ними, однако их гиперсети, их наполнение содержанием могут быть очень разными. Более того, не исключено, что один мозг будет более мощным разумом, развитой гиперсетью, а у другого эта гиперсеть будет развита слабо. Нейронная гиперсеть у Платона была, видимо, очень мощной. За счет чего такое происходит? Один из основных инструментов развития нейронной гиперсети у человека — мышление. Мозг, генерируя новые комбинации нейронов, коги, способен сохранять их как уникальные элементы личности, опыта в этой гиперсети. А дальше следует вопрос: как много вы думаете? Знаменитый ответ Бернарда Шоу: «Мало кто думает чаще, чем два или три раза в год. Я добился всемирной известности благодаря тому, что думаю раз или два в неделю».

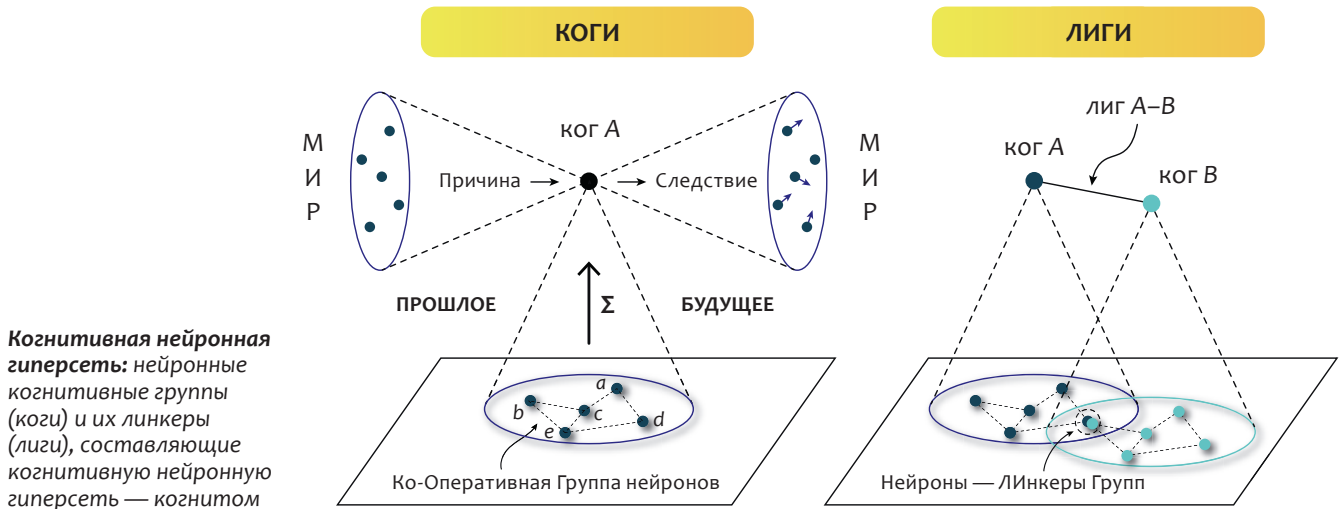
— **Я прочитала, что мозг — самый «жадный» орган из всех, потому что забирает очень много кислорода и вообще много ресурсов у организма. Есть мнение, что он сам принимает решения и ставит нас перед фактом. Он может быть настолько автономным?**

— Очень важные вопросы, возвращающие нас к самому началу: кто есть «я» и как это понятие соотносится с моим мозгом? Я — это личность, существо, человек. В меньшем объеме, чем тело, личность не существует. Однако сосредоточие личности, как мы видели, — нейронная гиперсеть мозга. Вместе с тем, чтобы эта гиперсеть сформировалась и мозг стал тем, что он есть, он должен находиться в теле. Именно тело позволяет ему взаимодействовать с окружающим миром, действовать, испытывать потребности, боль, желания, страсти. Выньте этот орган и положите в поддерживающую его метаболизм колбу — и вы разум не разовьете.

— **Как в романе А.Р. Беляева «Голова профессора Доуэля»?**

— Голова профессора Доуэля содержала мозг, сформировавшийся в результате сотен тысяч, миллионов эпизодов роста когнитивной гиперсети, которые прошел младенец, ребенок, юноша, ставший в конце концов профессором Доуэлем. Когнитом в этом мозге уже создан. Если же нет такой гиперсети, нет кварталов, домов, улиц, улочек, переулков в этом городе — не будет и городского трафика, ментальных процессов, сознания.

Согласно гиперсетевой теории, говорить, что мозг сам по себе, что он решает за нас, неверно. Почему? Потому что нейронная гиперсеть, когнитом, имеет два уровня — осознаваемый и неосознаваемый, но оба они суть разум, процессы в них разумные. Решения, принимаемые гиперсетью



Когнитивная нейронная гиперсеть: нейронные когнитивные группы (коги) и их линкеры (лиги), составляющие когнитивную нейронную гиперсеть — когнитом

на неосознаваемом уровне, тоже представляют собой часть работы нашего разума, они обусловлены всем нашим предыдущим опытом, нашей историей, нашими знаниями.

— Как вы пришли к гиперсетевой теории мозга?

— Это непростой вопрос. Представьте, что вы неотступно думаете о решении какой-то проблемы. И за несколько десятилетий думали об этом около ста тысяч раз. Каждый такой мысленный акт — очередная ступенька лестницы. Когда-то вверх, а иногда и вниз. Огромное количество попыток, в которых ученый выдвигает гипотезу, сам же подвергает ее критике, убивает, выдвигает следующую, которую тоже убивает, и так годами. Как узнать, какие из ста тысяч ступенек лестницы оказались в итоге критическими?

В какой-то момент из таких многолетних попыток понять мозг сложилась идея когнитивных групп, которые я сокращенно назвал когами. Ког — это не только «Когнитивная Группа», но и «Кооперативная Группа». Вместе ее элементы создают новое качество. В английском языке термин *сод* обозначает также лицо или вещь, представляющие собой малую, но необходимую часть структуры, организации. Коги в этом смысле — частицы, атомы, необходимые причинно-действенные элементы опыта, знания, психики, когнитома.

Концепция когнитивных групп продолжает идею «чувственных групп», «естественных групп» или «центральных групп одновременного действия», принадлежащую выдающемуся физиологу XIX в. И.М. Сеченову. Характеризуя их, он, в частности, писал: «Одновременному определенному комплексу извне всегда соответствует определенная чувственная группа». Представления о системных клеточных группах с высшими свойствами продолжают и линию теории функциональных систем, к школе которой я принадлежу. А идея лигов, линкеров групп, когнитивных связей,

кодирующих знание об отношении внешних объектов между собой, развивает теорию временных нервных связей, принадлежащую другому нашему великому физиологу — И.П. Павлову. То есть ответ на ваш вопрос может быть и таким: гиперсетевая теория мозга выросла из того, что достигли наши предшественники, великие ученые.

Когнитивные группы и связи между ними представлены в мозге рассеянно. Их можно вообразить как нейронные облака. Один когнитивный элемент — это целое облако нервных клеток в мозге. Другой такой элемент — тоже облако в этом же мозге. То есть это облако в облаке. И таких облаков многие тысячи, возможно, миллионы. Это облака в облаках в облаках и т.д. На определенных подмножествах своих нейронов, лигах, они многократно перекрываются, так что изменения в одном облаке моментально распространяются на сотни других. Именно это, когда я назову какое-нибудь ключевое слово, активировав его ког, позволяет вам вытащить из своей памяти все, что ассоциировано с этим понятием, что вы знаете или помните в связи с ним.

Разложить всю эту систему в рамках анатомических координат и сказать, что вот это облако расположено в таком-то участке коры, а это в таком-то и между ними пролегают отростки нейронов, которые их связывают, невозможно. С другой стороны, если отойти от трехмерных координат, эти элементы образуют строго упорядоченное пространство. Поэтому в какой-то момент возникло понимание, что над нейронной сетью, образующей основу для таких облаков, формируется особая сеть из вершин этих групп, имеющая другую архитектуру, свою топологию. И она, как я уже говорил, растет, хотя сама нейронная сеть при этом в размере не увеличивается. Так возникла идея гиперсети. На ее нижнем уровне трехмерная структура мозга, а сверху — структура нашего разума, психики, личности, нашего «я», обладающая уже

совершенно другим устройством, свойствами, причинностью психологического уровня.

Создав концепцию нейронной гиперсети, я стал искать, существуют ли в математике представления о такого рода структурах, и выяснил, что есть, но немного. В ключевых руководствах по теории сетей вы не найдете упоминания о гиперсетях. Специалисты по теории сетей, которым я задавал вопрос о гиперсетях, смотрели на меня с непониманием. Но некоторые группы математиков приходили к этой концепции.

Одна из них развивает представления британского физика-теоретика и математика Рональда Аткина, который в начале 1970-х гг. пришел к идее, что существуют такого рода топологические структуры, образующиеся на границах разных уровней организации материи. Его учебник, профессор Джеффри Джонсон, опубликовал в 2013 г. монографию по гиперсетям в сложных системах. Однако надо сказать, что другие математики понимают под гиперсетями совсем иные структуры. Похоже, эта область математики еще не до конца устоялась. Но я надеюсь, что исследования гиперсетей мозга подтолкнут математику к созданию языка описания таких структур, так же как в свое время исследования в физике направляли развитие математической физики.

Общий прогресс науки идет в этом направлении, и сегодня вслед за вопросом об устройстве внешнего мира на повестке стоит вопрос об устройстве внутреннего мира человека, о том, кто мы и откуда. Все религии мира дают ответы на эти вопросы. Но когда на них начнет давать удовлетворительные ответы наука, человечество ждет масштабный когнитивный переворот — возможно, даже более существенный, чем во времена дарвиновской революции, изменившей понимание человеком своего места в природе.

— То есть это будет ответ на вопрос, что такое сознание, разум, мышление?

— Да, именно на эти вопросы наука XXI в. должна попытаться дать ответы. Если хотите, по сути это вопросы и о природе души. Последние 400 лет западная цивилизация жила в значительной степени под влиянием идей Декарта, разделившего всю природу на мир протяженный, физический, и мир духовный. Этот второй мир он описывал равнозначными для него понятиями разума и души — *mind* и *soul*. Для него это было одно и то же. Современная наука исходит из того, что мир един и разум есть часть этого мира. Поэтому научное решение проблемы разума будет означать, что мы решаем и вопрос о природе души.

— Как вы думаете, это отразится на религиозных взглядах?

— Если ваши религиозные убеждения не колеблют факты о происхождении животного мира и человека, накопленные биологической наукой со времен Дарвина, то у вас не будет проблем и с религиозными представлениями о душе на фоне накапливающихся данных науки о мозге.

Сложнее тем, кто, как я, находит такие противоречия. Здесь я бы разделил вопрос на две части: онтологическую и морально-этическую. В области онтологии, наших представлений об устройстве мира, в том числе и нашего внутреннего мира, человеческого разума, души, нам придется все больше и больше опираться не на религиозные, а на научные представления, хотя и в них нас могут ждать крупные потрясения. Гораздо сложнее с моралью. Опыт последних полутора веков показывает, что попытки построить моральные принципы, секулярную этику, исходя из тех или иных научных представлений, были, мягко говоря, малоуспешными, если не сказать катастрофическими. Скорее всего, современная наука еще не обладает таким надежным фундаментом для выработки этих устоев, какой был накоплен религией на основе тысячелетней практики человеческого общежития. В этом смысле религиозная мораль при всех ее несовершенствах будет, по-видимому, еще долго составлять эмпирически более надежную опору для правил человеческой жизни и поведения.

Трудными вскоре окажутся вопросы соотношений на стыке изменяющейся под влиянием науки онтологической картины мира, в том числе и мира внутреннего, и религиозных положений, проработанных на основе представлений об устройстве мира, существовавших несколько тысяч лет назад. Тут я преклоняюсь перед отвагой Далай-ламы,



На диалоге российских ученых и философов с Далай-ламой о природе сознания

считающего, что если наука покажет, что в мире что-то устроено не так, как это сказано в буддизме, то буддизм, который он считает на одну треть религией, на вторую философией, а на третью наукой, должен будет отказаться от этого своего неверного постулата.

— Сотрудничество российских ученых с Далай-ламой продолжается?

— Продолжается, и очень активно. Исходной мотивацией российских ученых и философов было более глубокое знакомство с подходами буддизма в области исследования психики и сознания. Главный тезис Далай-ламы заключается в том, что если мы занимаемся мозгом и сознанием, то это субъективный мир и эффективно исследовать его можно, заглядывая не в мозг, а внутрь этого мира. Далай-лама утверждает, что буддизм как эмпирическая наука, посвященная исследованию своего «я», за 2,5 тыс. лет накопил огромный материал, которым не располагает западная психология. И тот, кто занимается мозгом, должен быть очень внимателен к этой части материала. Далай-ламой двигало также и желание познакомиться с российскими научными школами. До этого он 30 лет общался с американскими и западноевропейскими учеными, а у нас разные подходы. Первые наши разговоры с ним и с большой группой буддистских монахов-исследователей заключались как раз в попытках объяснить, в чем специфика российских научных школ, исследующих мозг и сознание. А она связана в значительной степени с революционными идеями в отечественной физиологии и психологии первой половины XX в., когда проникновение в Россию идей марксизма, диалектического и исторического материализма создало новую методологическую основу для исследования вопросов, решавшихся в западной науке другими средствами.

Важнейшим продолжением этих встреч было то, что некоторые из российских ученых, участво-

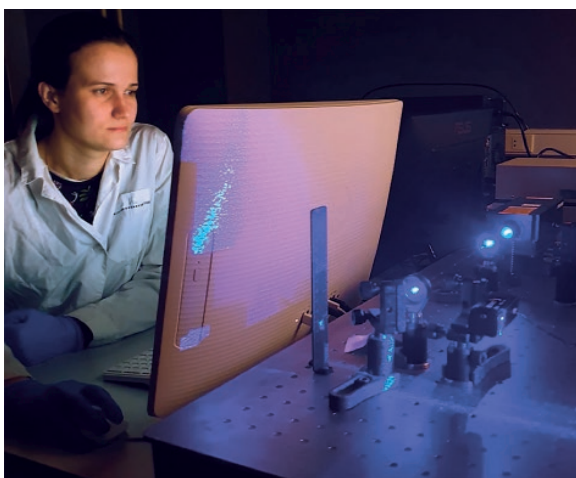
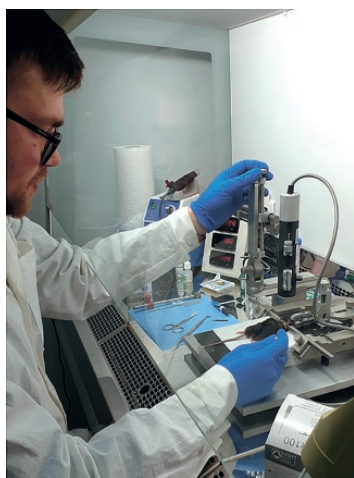
вавших в диалогах, заинтересовались возможностью проведения экспериментальных исследований в самых интригующих областях человеческого сознания и работы человеческого мозга. Академик С.В. Медведев организовал целую группу таких российских исследователей, ведущих экспертов в области изучения человеческого мозга, экстремальных состояний, которые развернули две исследовательские лаборатории в буддистских монастырях на юге Индии. Они также организовали подготовку буддистских монахов для работы в этих лабораториях, им читали лекции по нейробиологии, нейрофизиологии, философии сознания, монахи проходили обучение работе с методами изучения мозга в России. Научные исследования в этих лабораториях сейчас активно развиваются.

— Константин Владимирович, если бы вам сказали, что вы можете задать любой вопрос, ответ на который поможет вам кардинально дополнить теорию мозга, в чем бы он заключался?

— Я бы спросил, какова структура этого пространства. Если знать это, то, двигаясь назад во времени, можно понять законы его возникновения. А двигаясь вперед, можно понять многое о законах динамики этой материи, то есть мышления, сознания.

— Вы один из руководителей проекта «Мозг и информация: от естественного интеллекта к искусственному». Для чего он создан?

— Чтобы ответить, надо вначале сказать несколько слов о самом проекте. Его возглавляет ректор МГУ академик В.А. Садовничий, и кроме МГУ в проекте участвуют еще два института — Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН и Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН. Мы оказались в числе победителей на конкурсе крупных научных проектов, организованном Российской академией наук



Эксперименты в Институте перспективных исследований мозга МГУ по проекту «Мозг и информация: от естественного интеллекта к искусственному»

и Министерством науки и высшего образования с целью развития фундаментальных научных исследований для долгосрочного развития России. Таким образом, первый ответ на ваш вопрос: проект был создан для долгосрочных фундаментальных исследований в области функций мозга.

Теперь более конкретно. То, о чем у нас шла речь раньше, может быть сформулировано и следующим образом. Главная специфика мозга в том, что он кодирует особый тип биологической информации — когнитивную информацию. И мы думаем, что на основе наших предыдущих исследований у нас в руках есть инструмент, который позволяет увидеть в работающем мозге, как он генерирует эту новую когнитивную информацию, в каких нервных клетках это происходит и по каким принципам. То есть мы можем начать задавать вопросы, что такое эта информация, как она запоминается, где хранится, как извлекается и используется. Это требует масштабного набора новых подходов. С одной стороны, они обращены к тому, как нервная клетка, сталкиваясь в головном мозге с новой информацией, запоминает ее и включает специфические молекулярные механизмы; с другой стороны, это поиск таких молекулярных зондов, которые будут универсальными индикаторами подобных процессов в нервных клетках и позволят количественно измерять эту новую информацию — иначе говоря, сказать, сколько битов информации родилось в мозге в момент того или иного когнитивного события. Для этого нужны новые инструменты молекулярной биологии, геной инженерии, физики, фотоники. С третьей стороны, решение этих вопросов открывает новые перспективы в попытках воспроизвести элементы этого процесса в искусственных системах. Это путь перехода от принципов, которые мы хотим понять для биологических нейронных сетей, к искусственным нейронным сетям.

Чтобы реализовать все эти задачи, в проекте собрались сильные группы российских исследователей в области молекулярной генетики и эпигенетики, биохимии, клеточной нейробиологии и нейрофизиологии, изучения поведения, нейрофотоники и спектроскопии, моделирования математических структур и искусственного интеллекта.

Мы надеемся, это продвинет нас в решении того, что мы считаем крупнейшей фундаментальной загадкой мозга, зацепившись за которую, можно будет расшифровать все остальное. Кроме того, это позволит подготовить некую платформу для следующего шага в разработке систем ИИ, имитирующих то, что делает мозг. В нашем коллективе есть и физики-теоретики, которые занимаются поисками фундаментальных принципов работы такого рода систем.

Проект очень сложный. В каком-то смысле он напоминает Вавилонскую башню. Мы все говорим

на разных языках. В этом отношении проект представляет собой и попытку отработать взаимодействия между людьми, которые в своих профессиях накопили опыт совершенно разного употребления одних и тех же терминов.

— А гуманитариев нет в этой группе, философов прежде всего?

— Нет. Но это связано не с самим характером проблемы, а со спецификой проекта. Это, с одной стороны, опора на фундаментальную науку, уходящую глубоко в детали устройства нервной системы, а с другой — дань тому, что можно практически получить из этой тонкой инженерии нервной системы. Однако наряду с этим проектом в МГУ в прошлом году была создана и новая научно-образовательная структура, широко ориентированная на обсуждаемый нами комплекс проблем, — научная школа «Мозг, когнитивные системы и искусственный интеллект». И она как раз объединяет представителей очень разных факультетов — не только физического, механико-математического, вычислительной математики и кибернетики, биологического, но и психологического, физиологического и философского.

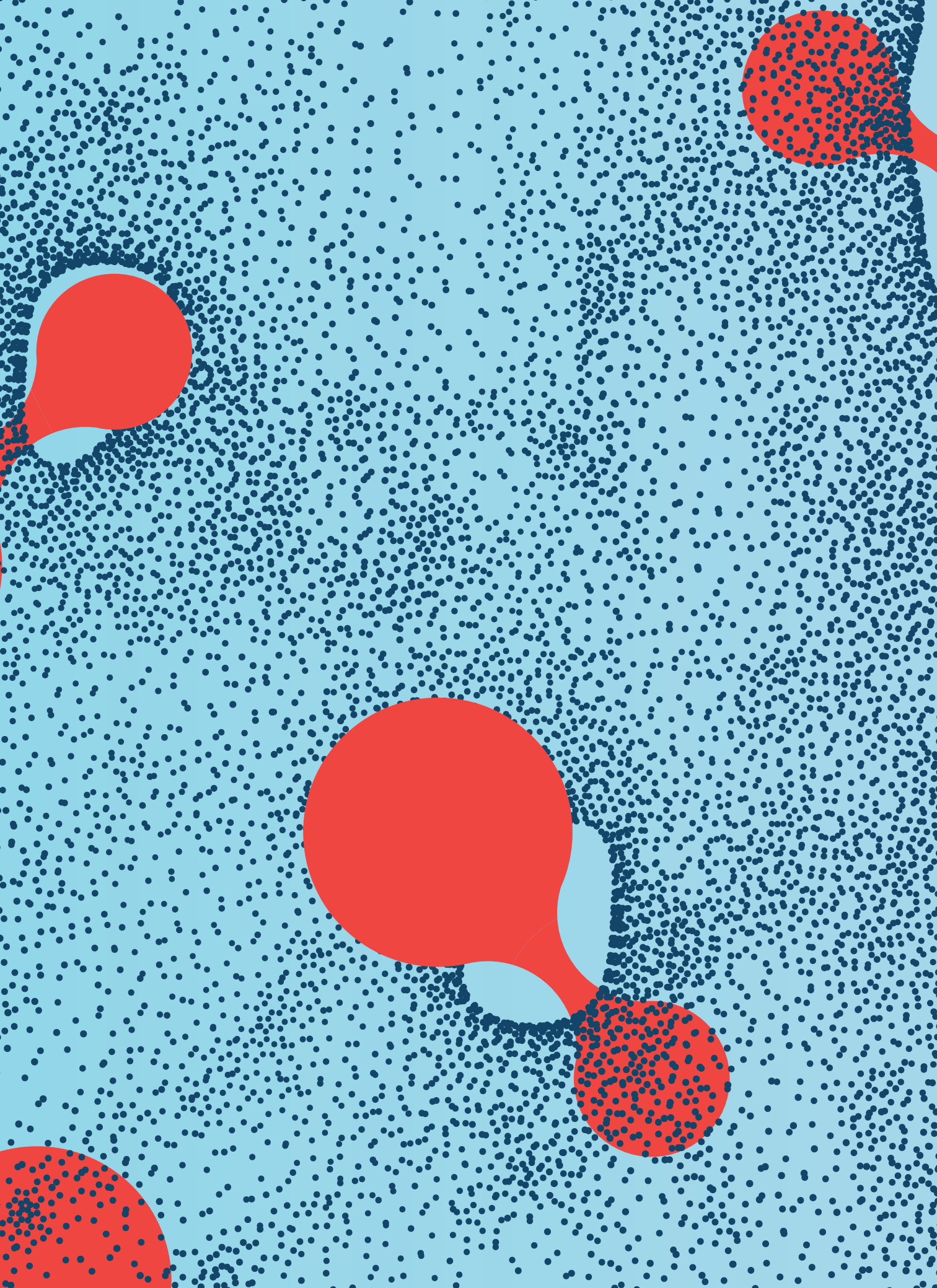
— На сколько лет рассчитан проект?

— Проект очень короткий, всего два с половиной года. За это время мы должны продвинуться в методах исследования когнитивной информации в биологических нейронных сетях и начать подготовку инструментария в сфере ИИ, в частности создать методы визуализации того, что происходит в искусственных нейронных сетях, на разных их глубоких слоях, когда они занимаются решением тех или иных задач.

— Каких вы ожидаете результатов в области искусственного интеллекта?

— Я бы не стал предсказывать тут конкретные результаты. Исследования сегодня эволюционируют стремительно: если бы мне пять-десять лет назад сказали, что в моей области можно будет достичь того, что мы сейчас имеем, я бы, как и большинство моих коллег, не поверил. Поэтому сегодня гораздо важнее понять правильный вектор развития, выработать наиболее эффективные пути продвижения по нему. Вектор, на мой взгляд, будет состоять в том, что произойдет новое обогащение ИИ знаниями устройства нейронных сетей мозга, принципов обучения в них, кодирования ими когнитивной информации, в конечном счете — механизмов мышления и сознания. Еще можно предвидеть, что на этом пути возникнут глубочайшие этические проблемы. Мы сегодня гораздо больше, чем ранее, обладаем возможностью заглянуть внутрь устройства самих себя. И правильное приложение этих знаний потребует от человечества огромной ответственности. ■

Беседовала Ольга Беленицкая



КЛЕТОЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: *от мифов к реальности*

За всю многовековую историю медицины в ней произошло несколько революций, каждая из которых повышала среднюю продолжительность жизни человека. Одна из них пришлась на начало XXI в. и происходит прямо на наших глазах.

Член-корреспондент
РАН А.В. Васильев



На клеточные технологии возлагают большие надежды, а на рынке уже можно встретить зарегистрированные биомедицинские клеточные продукты (БМКП). Каковы возможности клеточных технологий? Рассказывает член-корреспондент РАН **Андрей Валентинович Васильев**, директор Института биологии развития им. Н.К. Кольцова РАН, заведующий кафедрой эмбриологии биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

— **О клеточных технологиях часто говорят как о некоей революции в биомедицине. В чем это проявляется?**

— Мне кажется, слово «эволюция» здесь подходит больше. Использование клеточных технологий приближает нас к качественным изменениям в лечении ряда болезней и в целом в медицине. Уже сегодня открываются ранее недостижимые горизонты и перспективы, поскольку речь идет о совершенно ином принципе. Прежде медицина угнетала или репрессировала нечто чужеродное и опасное: останавливала воспаление, удаляла хирургическим образом новообразование или применяла ядерные методы для уничтожения какой-то ткани, использовала антибиотики, чтобы подавить рост микроорганизмов, и противовирусные препараты, чтобы устранить вирусную активность. У клеточных технологий принцип иной: речь идет о задействовании живых клеток человека для стимуляции каких-то функций или замены утраченных.

Клеточные технологии и клеточные продукты, или, как их сейчас называют, биомедицинские клеточные продукты, располагаются где-то посередине между

лекарственными средствами и донорскими органами. Кстати, донорство органов можно считать в своем роде предтечей регенеративной медицины. Ведь донорский орган пересаживают фактически без изменений. А в случае лекарственных средств новое свойство препарата часто появляется в процессе производства.

Клеточные продукты как бы совмещают в себе характеристики донорства и лекарственных препаратов. С одной стороны, мы используем живые биологические объекты, живые клетки донора, а иногда и самого пациента. С другой — новое качество этих клеток в процессе технологических манипуляций проявляется в виде мини-органов, эквивалентов тканей и органов, конструкций лечебного действия. Поэтому любой клеточный продукт можно считать и донорским биологическим объектом, и новым лекарственным средством. В этом и состоит эволюция биомедицины, которая развивается уже около 50 лет.

Однако уже сегодня понятно, что многие болезни человечества, в том числе инсульт, нейродегенеративные заболевания,

инсулинозависимый диабет и другие, можно будет победить именно с применением подходов клеточных технологий.

Конечно, я перечислил не все направления. Тем не менее упомянутые примеры — наиболее популярные области, где уже достигнуты однозначные результаты.

Прямо сейчас специалисты решают важные задачи, связанные с восстановлением кожных покровов. Во всех технологически развитых странах уже сегодня раны, ожоги, длительно заживающие язвы лечатся с помощью клеточных технологий и клеточных продуктов. Речь идет об эквивалентах кожи или клетках, которые стимулируют репарацию кожи. Этот вид лечения уже считается неким золотым стандартом.

Среди других важных направлений — репарация кости, проблемы, связанные с реконструкцией глаза и сосудов, реконструкции верхних дыхательных путей. Пусть это первые шаги клеточных технологий, но они уже показывают высокую эффективность.

И, конечно, клеточные технологии постепенно внедряются в сферу онкологии. На протяжении многих лет предпринимались попытки использовать клетки для специфической и очень высокоэффективной борьбы с опухолями. Подобные клетки реконструируют таким образом, что они начинают выполнять функции клеток иммунной системы для целенаправленной атаки на опухоль.

Нельзя забывать, что развитие клеточных технологий — это полувековая история иллюзий и разочарований. Специалисты возлагали большие надежды на некий универсальный клеточный тип — клеточную «золотую пулю», которая решит все наши проблемы. Словно клеточные технологии — это панацея сразу и от нейродегенеративных заболеваний, и от инфаркта миокарда, и от патологии печени и прочего. Но природа вновь напомнила нам, что она намного сложнее и изощреннее.

Поэтому сегодня приходится уходить от простых решений. И я считаю, что впереди нас ждут триумфальные открытия в клеточных технологиях, хотя пока не существует инструмента, чтобы решить проблемы, о которых я говорил. Но мы точно уже очень близко.

Чтобы клеточные технологии работали эффективно, необходимо получать определенные клетки пациента, которые будут соответствовать ряду критериев. Во-первых, это должны быть собственные клетки человека — аутологичные клеточные продукты.

Во-вторых, клетки должны выполнять специфическую функцию, то есть быть специализированными. Если мы говорим, например, о компенсации инсулинзависимого диабета, то нужны клетки, способные экспрессировать проинсулин. В-третьих, что очень важно, клетки должны быть безопасными. Они не должны индуцировать опухолевое состояние или передавать инфекционные агенты при трансплантации. Если мы научимся получать клетки, отвечающие всем трем критериям, то получим инструмент, который позволит лечить многие тяжелые заболевания.

— Как обеспечить безопасность клеток?

— Этот довольно сложный процесс. Распространено ложное представление, что клетки, поскольку они живые, не могут наносить вреда организму. Однако я готов утверждать и доказывать, что по сравнению с лекарственными препаратами клетки более опасны, поскольку менее всего изучены сегодня в качестве трансплантата или средства терапии. В случае введения лекарственного препарата в организм человека мы всегда четко знаем, как это лекарственное средство метаболизируется в организме, когда будет выведено и прекратит свое действие. При введении клеток в организм человека мы вообще не можем предсказать, куда они мигрируют, как долго сохранятся в организме, какую функцию индуцируют, что могут ингибировать, какие эффекты мы получим.

Научное сообщество пока мало знает о клетках и об их поведении в организме человека. И даже аутологичные клетки могут быть весьма опасны, поскольку проходят стадию культивирования и технологических манипуляций вне организма. Ясно, что мы контролируем процесс, следим за изменениями клеточных функций и генома. Но все ли изменения мы можем протестировать и проконтролировать перед тем, как введем эти клетки в организм человека? Поэтому необходимы осторожность и ответственное отношение к клеточной терапии. Иначе мы дискредитируем революцию, о которой говорили ранее.

— Проводятся ли испытания, которые определяют, как клетки перемещаются уже в организме?

— Здесь тоже следует упомянуть распространенное мнение, что про аутологичные клетки мы уже все знаем и вроде бы никаких предварительных доклинических исследований проводить не нужно. Напомню,

что для лекарственных средств разработаны серьезные программы доклинических исследований.

В случае клеточных технологий это проблема весьма нетривиальная. Например, трансплантат, который мы будем вводить в организм человека, содержит человеческие клетки. Но испытывать его мы должны на модельных животных. Таким образом, иммунная несовместимость становится преградой для подобного рода экспериментов. Приходится придумывать специальные модели, проводить иммуносупрессию, что так или иначе влияет на организм, или моделировать на животных определенные патологические процессы.

Сегодня ученые активно разрабатывают методы и подходы для моделирования патологий человека на животных с целью изучения и обеспечения качественных доклинических исследований.

Помимо этого, существуют аспекты, связанные с онкологическими изменениями. Например, клетки после трансплантации

в организм могут сами претерпеть онкологическую трансформацию, а могут индуцировать какие-то патологические процессы.

Клеточные технологии, с одной стороны, несомненно стали революцией в медицине. Они дают невиданные возможности для победы над многими заболеваниями. С другой стороны, нельзя забывать основной принцип медицины: не навреди. Поэтому к клеточным технологиям, как и ко всему новому в медицине, нужно относиться ответственно и осторожно.

— Можно ли сказать, что последствия введения клеток в организм человека, пусть и его собственных, непредсказуемы? Эдакая рулетка.

— Да, верно. Однако ученые всегда стараются минимизировать такие случайности. В доклинических моделях мы наблюдаем за распределением клеток у мышей, крыс, свиней, обезьян. Введение клеток в организм человека проходит уже в рамках первых клинических исследований, поэтому следить за распределением клеток очень сложно. Их наличие в организме невозможно измерить. Поэтому и в биомедицине существуют некие «черные дыры», разгадать которые мы пока не в силах. Ученым

Коллекция клеточных культур Института биологии развития РАН в криохранилище



остаётся накапливать информацию по косвенным данным, по методам аналогий, привлекая результаты аналогичных экспериментов и моделей, изучая, как клетки мигрируют, как себя ведут и какое оказывают воздействие. Но в целом элемент неизвестности до сих пор существует.

Сегодня в мире формируются несколько крупных научных программ, посвященных исследованию генома: «Геном», «Транскриптом» (анализ экспрессии генов), «Метаболом» (изучение белковых и метаболических процессов). Научное сообщество инициировало создание программы «Цитом», которая призвана проанализировать функции всех клеток организма. Как оказалось, мы достаточно плохо знаем свой организм и собственные клетки. Известно, что в организме человека 210 специализированных типов клеток. В целом мы знаем, как они формируются, но нам ничего не известно о границах их пластичности: во что они могут превращаться, какие функции могут выполнять.

Поэтому ученые всего мира пытаются создать некую базу данных, которая будет хранить информацию обо всех клетках организма с описанием их характеристик. Как мне кажется, это очень важно как для понимания причин некоторых заболеваний, так и для подходов к их лечению.

— Существует несколько заблуждений, связанных с клеточными технологиями. Согласно одному из них, клеточные технологии предполагают работу только со стволовыми клетками. Так ли это на самом деле?

— Это действительно заблуждение. Само понятие «стволовые клетки» — абсолютно биологическое. Клетки бывают стволовыми, транзиторными амплифицирующими, терминально дифференцированными. Это иерархические стадии, которые важны для понимания функций и закономерностей клеток. При обеспечении эффективности и безопасности клеточных технологий не имеет значения, стволовые это клетки или нет.

В России в 2016 г. был принят закон о биомедицинских клеточных продуктах, который разрабатывался на протяжении долгих семи лет. Существовали разные взгляды на проблему клеточных технологий. Потом все-таки ведущие специалисты пришли к консенсусу и закон был принят. Так вот, в этом законе нет ни одного упоминания о стволовых клетках. Если вы спросите клеточного биолога о стволовых

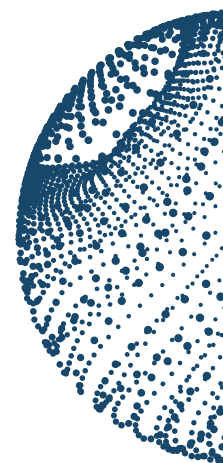
клетках, он сразу попросит уточнить, о каких конкретно клетках вы говорите, поскольку это некое обобщающее понятие, внутри которого функционируют разные виды клеток. Огромный океан, внутри которого разные моря. Существуют, например, плюрипотентные стволовые клетки, стволовые клетки крови, эпителиальные и т.д. Каждый тип обладает присущими ему свойствами. Мои коллеги и я читаем в МГУ курс из десяти лекций «Биология стволовых клеток». Каждая лекция посвящена одному типу стволовых клеток. Их много, они разные, но к клеточным технологиям напрямую они отношения не имеют.

— Другое заблуждение связано с тем, что клеточные технологии предполагают использование эмбрионов. Многие считают это неэтичным и неправильным. Что говорят ученые?

— Ученые говорят разное. Более того, мнения менялись в процессе развития клеточных технологий. Ученые и медики, будучи в основном прагматиками, в свое время действительно возлагали большие надежды на фетальные и эмбриональные клетки. Эмбриональные клетки формируются на ранней стадии зародыша, в первые несколько суток развития. Это клетки внутренней клеточной массы бластоцисты, то есть зародыша. А фетальные клетки — это в основном абортный материал.

Выскажу свою позицию. Я очень рад, что законом № 180 «О биомедицинских клеточных продуктах» в Российской Федерации введен запрет на использование клеток, полученных с разрушением эмбриона или плода человека. То есть в нашей стране фетальная и эмбриональная терапия запрещены. Поэтому не стоит опасаться, что в России в рамках клеточных технологий будут использоваться эмбриональные и фетальные клетки.

Эта позиция соответствует и моральной, и технологической позициям мирового сообщества. Надежды на то, что фетальными и эмбриональными клетками можно победить какие-то заболевания, не оправдались. Прилагались огромные усилия, были созданы большие консорциумы, международные программы по использованию фетальных клеток для лечения нейродегенеративных заболеваний. В единичных случаях проявлялись какие-то эффекты. Но когда провели многоцентровые исследования по единому признанному протоколу испытаний, оказалось, что статистически

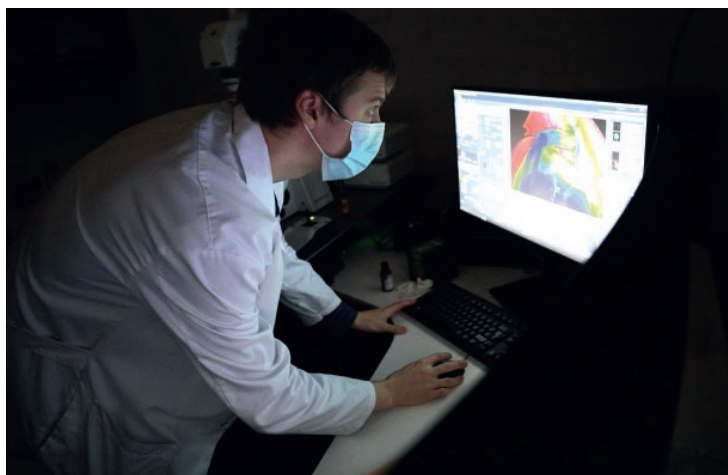


долговременных эффектов нет. Поэтому от фетальной и эмбриональной терапии отказались.

Существует достаточно много альтернатив эмбриональным и фетальным клеткам. Например, вместо эмбриональных стволовых клеток ученые обратились к клеткам с индуцированной плюрипотентностью. Речь идет об искусственных плюрипотентных стволовых клетках, которые в результате специальных генетических манипуляций имитируют свойства клеток раннего зародыша. За это исследование японский профессор Синъя Яманака, директор Центра прикладных исследований *iPS*-клеток Киотского университета (CiRA), получил в 2012 г. Нобелевскую премию. Благодаря предложенному им подходу у ученых появился аналог клеток раннего зародыша.

— Как ему это удалось?

Сотрудники группы оптических методов исследования ИБР РАН анализируют изображения, полученные на современных микроскопах



— Он действительно сделал нечто потрясающее. Яманака использовал клетки хвоста взрослой мыши, в которые ввел четыре гена, и клетки постнатального, как мы говорим, взрослого организма после интродукции четырех генов превратились в клетки двух-трехдневного зародыша. Он буквально повернул развитие вспять. Нарушил биологическую догму.

Необходимо отметить, что и фетальные, и эмбриональные клетки не могут быть аутологичными, ведь они всегда чужие для организма. Благодаря подходу Яманаки мы можем получать плюрипотентные клетки зародыша от того же взрослого человека.

Если же говорить о фетальной терапии и abortивном материале, то есть масса тканей, обладающих не менее интересными биологическими свойствами: клетки плаценты, пуповинной крови, пупочного канатика. Для их использования не нужно разрушать эмбрион.

Я уже говорил о моральной стороне вопроса. Когда разрабатывался «клеточный» закон, в дискуссиях приняло участие более 300 специалистов. Сторонники запрета на фетальную и эмбриональную терапию искали некую объясняющую формулу. Их оппоненты говорили, что используется только брошенный, никому не нужный материал. Но если есть запрос и хоть какой-то платежеспособный спрос, никто никогда не может гарантировать, что получение abortивного материала не будет поставлено на поток.

Современное цивилизованное общество четко установило, что женская репродуктивная сфера не может быть предметом коммерциализации. Это мировой подход. Таким образом, мы не можем допустить, чтобы была возможность получения материала такого рода на продажу или для дальнейшего коммерческого использования. Сегодня у нас есть возможности двигаться вперед к решению проблем регенеративной медицины и клеточных технологий, не используя эмбриональные или фетальные клетки.

— В продолжение потрясающей истории про обратимость развития поговорим о победе над старостью, о которой также дискутируют в контексте клеточных технологий и регенеративной медицины. Каково мнение ученых?

— Как правило, мы говорим не о победе над старостью, а об активном долголетии. Старение остановить нельзя. И не надо. Каждый человек должен пройти все стадии

жизни. Поверьте, на каждой из них есть свои приятные моменты. Но мы понимаем, что человек должен достигать старости активным, работоспособным, интеллектуально состоятельным.

Продолжительность жизни увеличивается на фоне новых достижений в науке. В свое время появилась целая отрасль — вакцинопрофилактика, которая отбросила назад инфекционные заболевания и привела к резкому росту продолжительности жизни. Развитие капитализма в Европе, возникновение крупных городов, производственных отношений напрямую связаны с вакцинами. Нашу жизнь и развитие цивилизации определяют не столько экономические условия, сколько результаты, полученные в биологических лабораториях.

Сегодня одной из насущных проблем в медицине и здравоохранении считаются нейродегенеративные заболевания, до которых раньше просто не доживали. Если клеточные технологии смогут победить эти болезни, то не только увеличится продолжительность жизни, но и улучшится качество жизни пожилого человека. Это и есть борьба за активное долголетие.

А что касается бессмертия, то я считаю, что его достижение стало бы крахом человечества как вида. Люди стареющие должны уступать место новым поколениям и новым геномам, более совершенным особям.

— Что известно о процессах регенерации в организме человека?

— Существуют два вида регенерации — истинная и компенсаторная. Истинная регенерация характеризуется процессом восстановления ткани или органа, которые были повреждены или утрачены. Например, у человека нет истинной регенерации, но есть компенсаторная, которая реализуется через замещение или рубец. Так, на месте сильного повреждения на коже появляется шрам. После операции на кишечнике на месте вмешательства образуются спайки — фактически рубцы. Если организм человека был подвержен токсическому воздействию алкоголя, то наблюдается фиброзная деградация печени. Проще говоря, точная структура ткани или органа не восстанавливается, как и функции не возвращаются в полном объеме. В этом случае единственный выход — в использовании лекарственных средств, точно нацеленных на восстановление поврежденных участков. Но наиболее эффективный и принципиально новый подход состоит в использовании клеток.

Специализированные, пригодные для трансплантации и аутологичные клетки позволяют вернуть утраченные функции. Например, при повреждении печени у нас есть возможность получить гепатоциты — клетки печени, взятые у самого пациента. При повреждении сердечной мышцы используются кардиомиоциты. Если у человека диабет или повреждена поджелудочная железа, помогут инсулинпродуцирующие клетки. А рубец на теле человека можно заменить новой красивой кожей.

— Есть ли предел возможностей у клеточных технологий?

— Пока предела нет. Более того, мы даже еще не вышли на тот уровень возможностей, который сегодня прогнозируем. Мы уже знаем, куда хотим попасть, какие клетки получить, примерно представляем, как двигаться в этом направлении, но пока нам не удалось получить специализированные клетки.

Приведу несколько цифр. В мире за 2019 г. официально было зарегистрировано всего 44 клеточных продукта. Это очень мало. При этом клинические исследования по единой базе проходят более 8 тыс. клеточных продуктов. По соотношению чисел заметно, что эта технология устремлена в будущее. И даже если из 8 тыс. только 10% клеточных продуктов получат одобрение и регистрацию, у нас сразу появятся 800 клеточных продуктов, что даст возможность для рывка.

Современные нейробиологи активно осваивают клеточные технологии для получения функционального нейрона. И он уже получен, в том числе в нашем институте. В целом эта задача уже решена. Но такой нейрон должен соответствовать упомянутым ранее критериям, то есть быть безопасным и выполнять специфическую функцию. Поэтому сейчас ученые трудятся над тем, чтобы клетки отвечали данным параметрам и были пригодны для трансплантации. Вообще, биомедицинская наука сейчас развивается с галопирующей скоростью. Все говорят об IT-технологиях, тогда как в США, например, инвестиции в биомедицину превалируют над инвестициями в IT-области в 17 раз. Конечно, в США развита система инвестиционных частных фондов, поэтому многие передовые проекты реализуются быстро. В нашей стране все намного сложнее.

Появляются также новые технологические и научные решения, которые отражаются на развитии клеточных технологий.

Уже описаны подходы к лечению серповидноклеточной анемии, некоторых опухолей, вирусных и наследственных заболеваний. Сочетание клеточных и генетических технологий — еще одна революция в медицине



Не утихают разговоры о редактировании генома. Только представьте, какие возможности откроются перед нами, если совместить редактирование генома с клеточными технологиями! Фантастический потенциал! Скажем, при наследственном заболевании появится возможность выделить клетки из организма человека, вне организма внести необходимые изменения в геном, «отредактировать» наследственное заболевание и вернуть уже здоровые клетки в организм человека.

Не менее актуальное направление связано с инфекционными заболеваниями. Уже существует, например, клеточный подход в лечении вируса иммунодефицита человека. Рецепторы, с которыми соединяется вирусная частица, известны. Поэтому в костном мозге человека достаточно удалить ген, отвечающий за экспрессию корцептора к вирусной частице ВИЧ, после чего вернуть здоровые клетки в организм человека, получающего резистентность к вирусу. Уже описаны подходы к лечению серповидноклеточной анемии, некоторых опухолей, вирусных и наследственных заболеваний.

Сочетание клеточных и генетических технологий — еще одна революция в медицине. Поэтому пока горизонты бесконечны и ограничений я не вижу. Напротив, каждый раз появляется что-то новое и обнадеживающее.

— **Расскажите об эквивалентах кожи, которые разработаны в вашем институте.**

— Для меня это очень интересная и в то же время тяжелая тема. Дело в том, что я и мои коллеги провели первую трансплантацию выращенного эпидермиса еще

в 1989 г. в Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова. Прошло уже 20 лет, а эти технологии до сих пор не внедрены в практику.

Сейчас мы чувствуем, что такая возможность появляется. Вначале мешало отсутствие нормативно-правовой базы. Но, к счастью, начиная с 2016 г. были разработаны все нормативно-правовые документы, которые нужны для развития этих технологий. Мы также получили поддержку Министерства науки и высшего образования на проведение доклинических исследований. Это было непросто, поскольку требовалось разработать все исследовательские модели. Наверное, мы были первыми в стране, кто проводил доклинические исследования официально по разработанным методикам, чтобы выйти на регистрацию. Но проблема в том, что сегодня для нас нет возможной производственной площадки для выпуска этих продуктов. А чтобы начать клинические исследования, необходимо нарабатывать продукты на сертифицированном производстве. Наш индустриальный партнер в особой экономической зоне «Технополис «Москва»» активно строит большой производственный участок, который обеспечит и других производителей клеточных продуктов. Пандемия и сложная финансовая ситуация отрицательно сказались и на нас. Но я надеюсь, что к середине 2021 г. мы сможем начать клинические исследования, а затем и выйдем на регистрацию клеточных продуктов в Министерстве здравоохранения.

Эти технологии уже не просто альтернатива, во многих случаях замена кожи — безальтернативный подход: например, в случае ран и ожогов у детей, которые очень чувствительны к боли, когда требуется максимально щадящее лечение.

В институте накоплен огромный опыт. Если посчитать все трансплантации с использованием разработанных нами конструкций в процессе выполнения научно-исследовательских работ, то станет понятно, что мы уже помогли более чем 800 пациентам. Для нас это некий долг — сделать так, чтобы в стране появились клеточные продукты. Осталось подождать несколько месяцев, и мы начнем производство эквивалентов кожи, выращенных из клеток.

— **Речь идет о готовых тканях?**

— Да. Это трехмерная подложка, биологический носитель, который обладает определенными свойствами. На его поверхности

расположены клетки эпидермиса — верхнего слоя, который мы видим на собственной коже, а внутри — клетки дермы, внутренний слой кожи. Таким образом, клеточный эквивалент представляет собой полнослойный аналог кожи.

Согласно расчетам, мы сможем создавать на производстве несколько тысяч продуктов в месяц. Этот трансплантат может использоваться для нанесения на поверхность трофической язвы, раны и с высокой эффективностью замещения дефекта восстанавливать поврежденный участок кожи. Поскольку трансплантат состоит из клеток, мы можем повторно использовать его, пока не добьемся полного восстановления кожного покрова.

— После вашего рассказа складывается ощущение, что мы уже попали в будущее. Тем не менее есть ли у вас прогноз, где ждать очередной революции?

— Соглашусь, будущее наступило, но давать прогнозы бессмысленно. Любые прогнозы затмеваются научными открытиями, которые порой очень трудно предсказывать. Однако все же есть некоторые тенденции, определяющие развитие современной биологии. Научное сообщество уже сильно приблизилось к такому уровню, когда с помощью генетических и клеточных молекулярных технологий мы можем воссоздать пусть и примитивный, но живой организм. Например, коллеги из США искусственно создали клетку микоплазмы — одноклеточного организма. Я не считаю себя специалистом в области синтетической биологии, но меня завораживают возможности синтетической эмбриологии. Здесь даже сложно описать перспективы, которых мы способны достичь как в научном смысле, так и в технологическом. Хотя, конечно, и эта сфера упирается в морально-этические проблемы.

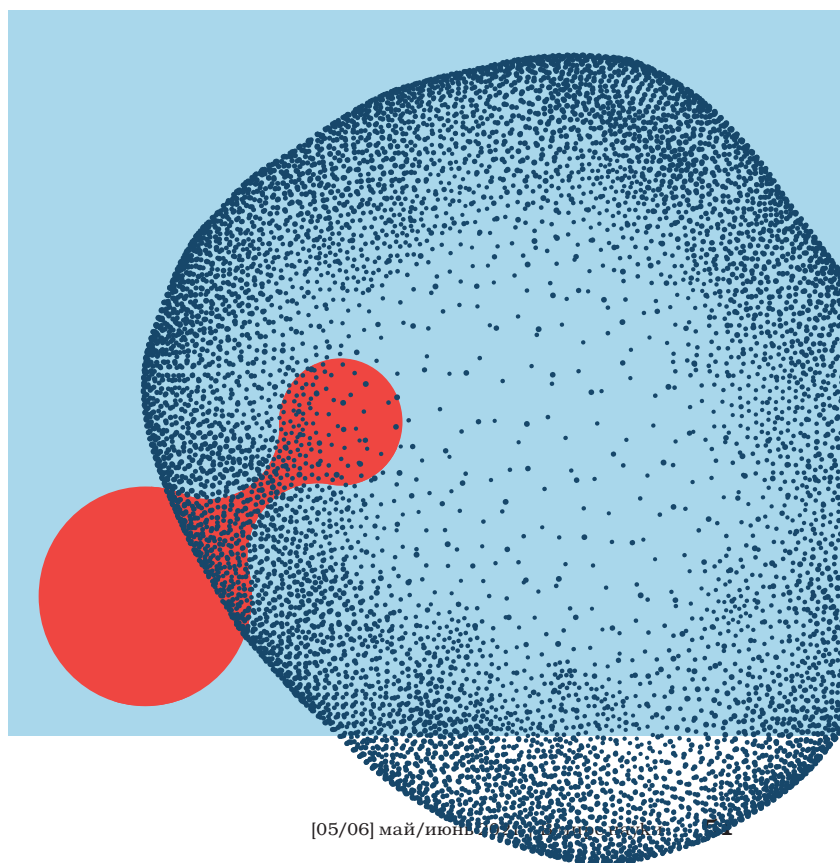
У нас есть клетки с индуцированной плюрипотентностью, клетки раннего развития, более того, для каждого человека мы можем получить клетки, которые будут соответствовать его раннему эмбриону. То есть мы подошли к тому, чтобы создать искусственный зародыш, фактически смоделировать раннее развитие. В научном смысле это потрясающе, поскольку эти знания всегда были закрыты для ученых. Это одна из неразрешимых загадок. Благодаря бурному развитию подобных подходов теперь специалисты могут моделировать такие процессы вне организма, конструировать зародыш и анализировать то, как он

развивается. Правда, есть ограничение работы до 14 суток, поскольку далее у зародыша начинается формирование нервной системы. То есть это не биологическое ограничение, а этическое, принятое сообществом ученых, и я его поддерживаю.

Помимо этого, клеточные технологии позволяют создавать подходы для направленной дифференцировки: мы можем индуцировать развитие клеток в ту или иную специальную область и получить, например, мини-мозг, мини-сердце, мини-печень и т.д. В данном случае я намеренно не упоминаю морально-этические вопросы.

Наука всегда опережает мораль и этику, поэтому неизменно нужно быть очень аккуратным в интерпретации и применении достижений науки, поскольку ученый одновременно и всесилен, и бессилен. После того как результат получен, исследователь не влияет на его внедрение. Мы помним, что из расщепления атома можно получить и мирный атом, и атомную бомбу. По этой же причине необходимо быть аккуратными с предсказаниями и прогнозами. Синтетическая эмбриология, клеточные и геномные технологии — три кита, которые обеспечат прорыв и в науке, и в технологиях, но при важном условии: что человечество будет правильно к этому относиться. ■

Беседовала Анастасия Пензина





“
**МЫ ЗНАЕМ ЛИШЬ
ОДИН ПРОЦЕНТ
ИЗ ВСЕГО МНОГООБРАЗИЯ
МИКРОБОВ**
”

Микроорганизмы присутствуют абсолютно
везде: в воде, почве, осадках водоемов,
подземной биосфере, горячих источниках и т.д.
На 1 м³ жилого помещения приходится порядка
20 тыс. микроорганизмов.



Член-корреспондент РАН Е.А. Бонч-Осмоловская

б интересной и загадочной науке под названием «микробиология» — наш разговор с членом-корреспондентом РАН **Елизаветой Александровной Бонч-Осмоловской**, заведующей кафедрой микробиологии биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, заведующей отделом биологии экстремофильных микроорганизмов Института микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН, президентом Межрегионального (Российского) микробиологического общества.

— **Елизавета Александровна, правда ли, что мы знаем лишь ничтожно малый процент из всего разнообразия существующих на планете микроорганизмов? С чем связан такой дефицит знания в этой области?**

— Это связано с тем, что объекты нашего изучения невидимы, мы не можем обнаружить их невооруженным глазом, и даже под микроскопом микробы мало отличаются друг от друга по своему внешнему виду. При этом они крайне разнообразны по производимым ими химическим процессам.

С момента открытия микробов Антони ван Левенгуком микробиология активно развивалась и пыталась изучить эти невидимые глазу объекты, объяснить, с какой стороны к ним подобраться, ставились всяческие ловушки, чтобы микроорганизмы раскрыли свои свойства.

В первой половине XX в. начался золотой век микробиологии. Основным подходом в то время было культивирование микроорганизмов в лабораторных условиях. Ученые выращивали популяции микробов, заставляя их размножаться, подбирали оптимальные для них виды среды и в итоге получали

чистую культуру, то есть популяцию, состоящую из совершенно идентичных микроорганизмов, которые произошли от одной и той же клетки.

Лабораторное культивирование стало важнейшим достижением микробиологии. Благодаря этому методу ученые смогли исследовать чистые культуры как единый организм и таким образом описывать множество их самых разных свойств. В этот период считалось, что мы знаем о микробах если не все, то очень многое. Но с появлением молекулярных методов исследования, когда стало возможным выделять ДНК из природных мест обитания, выяснилась страшная истина: в лабораторных культурах получен только 1% от всех микроорганизмов, существующих в природе! Мало того: есть многочисленные массовые группы микроорганизмов, которые, возможно, осуществляют важные природные процессы, но мы и о них ничего не знаем. Эта новость поставила под сомнение многие выводы, сделанные ранее, став настоящим ударом для микробиологов. Тем не менее наука бурно развивалась, и теперь мы изучаем микроорганизмы самыми разнообразными методами,

в том числе собирая их полные геномы из природной ДНК. С помощью такого анализа можно узнать свойства того или иного организма, минуя лабораторное культивирование.

— А работа с ДНК упрощает задачу микробиологу или усложняет?

— В изучаемых геномах новых микробов очень много генов с неизвестными функциями. И даже у микроорганизма, который ты научился растить в лабораторных условиях, может быть чуть ли не треть генов с совершенно непонятными функциями, и это при том, что природа очень экономна и не создает абсолютно ненужных генов. В этом, конечно, заключается сложность.

Объем получаемой информации такой огромный, что этого хватит на многие годы вперед, можно даже не ездить в экспедиции, а изучать то, что уже есть на руках. Новейшие методы в области микробиологии, с одной стороны, очень мощные и быстрые, но есть и другая сторона — ученые не успевают освоить этот огромный объем информации, так что работы у нас действительно много.

— Можно ли сегодня назвать микробиологию редкой специальностью?

— Нет, она не такая уж редкая — в отличие от классической биологии, зоологии, ботаники, чьи представители концентрируются в основном в университетах. Все-таки микробиология крепко связана с прикладной деятельностью. Микробы ископом веков использовались и в пищевой промышленности, и в домашнем хозяйстве, а сегодня активно применяются для получения биотоплива, разложения отходов и т.д.

— Какие еще примеры использования микроорганизмов мы можем вспомнить?

— Микробов используют в очистных сооружениях, при биоремедиации водоемов и земель, в различных областях промышленности. Вот, например, отбеливание бумаги, которой мы все постоянно пользуемся. Традиционно это делалось с помощью химических реакций, но с точки зрения охраны окружающей среды биологические процессы гораздо предпочтительнее, и теперь отбеливание бумаги производится с помощью термостабильной ксиланазы — фермента, разлагающего биополимер ксилан, который придает бумаге коричневый цвет. Новые ферменты нужны всегда, потому что ферментативные реакции часто экономичнее химических процессов. Синтез каких-то редких, сложных соединений можно проводить с помощью микроорганизмов. В общем,

здесь есть огромное поле для деятельности, а ее направления нередко диктуются рынком.

Микробиологов в мире достаточно много. Другое дело, что академические исследования в нашей сфере, как, наверное, и везде, подвластны некоему мейнстриму, моде; сегодня, например, уже гораздо меньше людей занимаются культивированием микробов.

— Если говорить о культивировании микроорганизмов: где брать исходный материал? Куда биологи ездят, чтобы собрать микроорганизмы?

— Могу рассказать на своем примере. Более 40 лет я проработала в Институте микробиологии им. С.Н. Виноградского (входит в ФИЦ Биотехнологии РАН). Там у нас была, и сейчас есть, активная группа по изучению микроорганизмов, обитающих в горячих источниках. Эти источники — настоящая золотая жила, кладесь, где можно обнаружить все что угодно. Там очень разнообразные микробы, все они живут при высоких температурах. Их ферменты невероятно устойчивы относительно не только температуры, но и других воздействий. В горячих источниках можно найти уникальные микроорганизмы, которые живут при температуре около 80–100° С, они называются гипертермофилами (от др.-греч. *thermos* — «теплый» и *phileo* — «любить»). Нашими учеными были организованы многочисленные экспедиции, в частности на Камчатку, Курилы, Чукотку.

Но интересных микробов можно встретить не только на Камчатке. В 2004 г. микробиологи Г.Б. и А.И. Слободкины нашли представителя гипертермофильных архей (археи — очень древняя, рано отделившаяся линия живых существ, наравне с бактериями и ядерными организмами) в очистных сооружениях Москвы. Оказалось, что



Центральное термальное поле кальдеры Узон (Камчатка)

это микроорганизм рода *Sulfophobococcus*, который ранее был обнаружен в горячих источниках Исландии. Как он очутился у нас в столице, неизвестно. В общем, микроорганизмы, причем самые разные, обитают повсюду, но мы их не видим.

— **Какие еще экстремальные условия, помимо температуры, удается выдерживать микробам?**

— Их много. Микробы успешно обитают в среде с повышенной кислотностью или, наоборот, в щелочных содовых озерах, в солевых растворах с концентрацией соли, близкой к насыщению, при высоком давлении и т.д. Микроорганизмы невероятно разнообразны.

— **Удивительно, что микробы могут выживать в таких условиях. Где они берут энергию?**

— Это важный вопрос, потому что на нашей планете главный источник энергии — свет. Растения на Земле используют энергию света и создают органическое вещество.

Микроорганизмы, способные к фотосинтезу, тоже есть, в том числе в горячих источниках. Это так называемые цианобактерии, то есть безъядерные организмы, прокариоты, которые как раз и создали кислородную атмосферу на Земле, потому что они первыми начали осуществлять фотосинтез, при котором из воды образовывался кислород. В горячих источниках современные цианобактерии образуют цианобактериальные маты — очень толстые слоистые образования, которые можно сравнить с чайным грибом, похожие на желе; сверху у них находятся фотосинтезирующие слои, а ниже — организмы, которые питаются биомассой фотосинтетиков. Но жизнь в горячих

источниках этим не ограничивается, потому что термофильные микроорганизмы могут использовать и энергию неорганических соединений: водорода, сероводорода, железа, аммония. Такие микроорганизмы называются литотрофами (от др.-греч. *lithos* — «камень»), и они умеют, помимо существования за счет энергии неорганических соединений, использовать для построения клеток неорганический углерод CO_2 .

Главное разнообразие микробов заключается в том, что они могут осуществлять множество различных химических реакций. И пусть эти организмы очень маленькие, но зато их много, а значит, в масштабах всей биосферы процессы, осуществляемые ими, очень значимы. Мне кажется, подобный вопрос находится вне интереса и внимания широкой публики, а ведь микробы не только делают нам кислую капусту или вызывают у нас болезни, но и совершают колоссальную химическую работу, за счет которой на Земле происходят



1. Оранжевое термальное поле кальдеры Узон.
2. Цианобактериальные маты — современный аналог древнейших ископаемых микробных сообществ — строматолитов (Восточное термальное поле Узона).
3. Медведи — нередкие посетители горячих источников.

глобальные циклы элементов. Это как раз и есть основа устойчивости биосферы: образуются какие-то продукты, которые кто-то потом обязательно потребляет, и т.д. — по цепочке. Таким образом эти циклы замыкаются, и в целом ничто не накапливается. Хотя, конечно, есть и исключения, например горючие ископаемые, которые скопились за миллионы лет существования нашей планеты, и теперь мы их интенсивно используем.

— **Если бы не было микроорганизмов, мы бы, наверное, уже погрязли в органических отходах?**

— Да, и это тоже. Все растительные остатки на планете разлагаются именно микроорганизмами. Древесину разлагают микроскопические грибы; бактерии и археи могут, в том числе при отсутствии кислорода, разлагать сложные полимерные субстраты, которые образовали растения и животные. То есть сложные органические соединения минерализуются, снова превращаясь в углекислоту и воду, и возвращаются в круговорот.

— **Вашим именем был назван один из недавно открытых микроорганизмов *Tepidiforma bonchosmolovskaya*. Расскажите, пожалуйста, об этом подробнее.**

— Это очень трогательная история. Недавно в нашем ФИЦ Биотехнологии РАН проходила ежегодная научная конференция. Там выступила моя молодая сотрудница Т.В. Кочеткова, открывшая и описавшая нового микроба. Причем это не просто новый вид, а представитель нового класса бактерий.

Открытие было совершено по итогам поездки наших молодых ученых на Чукотку несколько лет назад. До этого мы много лет ездили на Камчатку,

но оказалось, что на Чукотке тоже есть горячие источники. Экспедиция была сложной, наши сотрудники добирались к своей цели с огромными трудностями, но в итоге нашли горячие источники, которые ранее не исследовал ни один микробиолог в мире. Выступление Т.В. Кочетковой на конференции было посвящено этой группе чукотских источников. Удивителен сам факт их существования: представьте, вечная мерзлота, а в ней — горячие отверстия с температурой 90° С.

— **Это все находится на возвышенности?**

— Нет, по берегам ручьев и небольших рек. Этих источников очень много. С помощью молекулярных методов нашим ученым удалось определить, какие микроорганизмы там присутствуют. Но пока осталось непонятным, что же выступает источником энергии, почему при отсутствии органического вещества там бурлит жизнь, которую видно даже невооруженным глазом: это невероятно красивые волокна разных цветов — оранжевые, черные, белые. При этом в отличие от Камчатки, где в горячих источниках присутствуют водород и сера, здесь нет ни того ни другого. Есть предположение, что источником энергии для этих организмов становится растворенное в воде восстановленное железо, которого там довольно много, и микробы окисляют его кислородом воздуха. Участники экспедиции описали эти новые источники и выделили оттуда новых микробов, в том числе и того, о котором вы спрашиваете. В своем докладе Т.В. Кочеткова отметила, что давно хотела вместе с коллегами назвать микроба в мою честь. (Улыбается.) И вот наконец появился достойный кандидат, представляющий столь глубокую линию микроорганизмов.

3

— **А самому ученому можно назвать открытый микроорганизм собственным именем? Или это обязательно должны сделать коллеги по цеху?**

— Нет, называть микробов своим именем не принято. Более того, не приветствуется даже, если человек дает имя новому микроорганизму в честь своего прямого начальника. Кстати, когда присваиваешь название новому виду в честь какого-либо человека, ты должен объяснить, почему выбрал именно эту кандидатуру, в чем его вклад в науку и конкретно в эту область исследований. Для меня новость, что микроорганизму дали мое имя, была полным сюрпризом. До этого



я не думала, что такое может когда-нибудь случиться. Результаты исследований были оперативно опубликованы, потому что моих коллег могли опередить ученые из США, которые тоже изучали эту группу микроорганизмов. К счастью, мы оказались первыми. В микробиологии конкуренция очень высока.

— В последнее время на микробиологию возлагают большие надежды в плане разложения пластика, получения биотоплива и т.д. Насколько реальны такие перспективы?

— Эти направления, конечно, очень привлекательны для многих ученых, и работы в этой области ведутся. У нас в ФИЦ Биотехнологии РАН недавно закончился большой проект под названием «Энергоносители микробного происхождения: продуценты, пути образования, лабораторные модели получения». Этот проект поддержан Российским научным фондом (РНФ), которому я, пользуясь случаем, хочу выразить огромную благодарность. Их поддержка помогла нам очень многого добиться в наших исследованиях, опубликовать статьи в ведущих международных журналах. Но до внедрения наших разработок в практику пока еще далеко.

— В чем суть этого проекта?

— У нас было шесть задач: три фундаментальные и три прикладные. Фундаментальные исследования заключались в поиске новых микробов, которые образуют энергоносители, то есть богатые энергией продукты. Это касается только анаэробных процессов, потому что в присутствии кислорода органические субстраты полностью окисляются, тогда как в анаэробных условиях микроорганизмам приходится выбрасывать богатые энергией продукты: это необходимо для получения хоть какой-то энергии. Кроме того, мы изучали образование углеводов микроорганизмами, использование микроорганизмами минералов в качестве источников энергии.

— Неужели с помощью микробов действительно можно получить энергию?

— Да, и этим многие занимаются. Микроорганизмы, например, можно использовать для получения электричества из органических отходов. Во всем мире эти процессы сейчас активно исследуются и даже уже используются, в частности для получения микробного электричества из морских донных осадков.

— А в чем заключалась прикладная часть упомянутого вами проекта «Энергоносители микробного происхождения»?



В горячих источниках Восточного термального поля Узона живут микроорганизмы, получающие энергию из света, органического вещества и неорганических соединений

— В числе прикладных задач — работа с микроорганизмами, использующими CO (окись углерода, угарный газ), получение водорода из CO .

Была поставлена также задача по получению энергоносителей из органических отходов, и нам удалось с помощью термофильных микроорганизмов подвергнуть разложению птичьих перья и при этом получить метан, который потом можно использовать в том же хозяйстве. Птичьи перья — это на самом деле большая проблема, потому что их очень много производится при птицеводстве, образуются целые горы, но разлагаются они плохо и непонятно, как их утилизировать. С помощью метана, полученного из птичьих перьев, можно обогревать инкубатор, то есть получается замкнутый цикл производства.

Исследуя продукцию энергоносителей микроорганизмами, мы получили интересные результаты и по другим направлениям. Думаю, самое интересное, что у нас получилось в этом проекте, — это работа Д.Г. Заварзиной по окислению железа в анаэробных условиях, где акцептором электронов выступает не кислород, а CO_2 , и в качестве конечного продукта образуется ацетат. То есть из минерала, фактически из камня, и из углекислоты мы получили органическое соединение — уксусную кислоту! Это, конечно, не очень богатый энергией продукт, но зато из нее можно, опять же с помощью микроорганизмов (метаногенных архей), получить метан.

— Разложить пластик с помощью микробов реально или это пока только мечты? И сколько микробов потребуется, например, для пластикового стаканчика?

— Если мы говорим об объеме, то здесь технологию будет ограничивать не количество микробов, а сама поверхность пластика. Скажем, они облепят весь ваш стаканчик, создадут биопленку, а куда деваться следующим микробам? Если у нас есть подобная гетерогенная среда (неоднородная система, состоящая из однородных частей, разделенных поверхностью раздела), когда разлагается что-то нерастворимое, то, конечно, размолот этот стаканчик в пудру, мы быстрее добьемся его разложения, потому что полученные частички будут сопоставимы с размером самих микробов, но придется затратить столько энергии, что в итоге процесс окажется нерентабельным. В целом эффективное разложение пластика микробами — пока чисто умозрительная концепция, но работы в этом направлении ведутся и мы видим много обзоров на тему разложения пластика, особенно активно этот вопрос изучают в Индии и Китае.

— Вы руководите кафедрой микробиологии в МГУ. Востребована ли эта специальность среди молодых специалистов? И кого больше — юношей или девушек?

— Микробиология всегда считалась наукой для аккуратных тихих девочек, но сейчас и многие юноши хотят стать микробиологами. Сама я в свое время пошла на эту кафедру, потому что была страшно не уверена в себе и считала, что мне нечего даже соваться на другие, более престижные кафедры. «Пойду куда-нибудь, где поскромнее и потише», — рассуждала я.

Наша кафедра традиционно занималась в основном прикладной работой. И это положение дел не особенно изменилось со времен моего студенчества. Здесь очень сильная школа по биохимии, физиологии, но только новые технологии к нам пробираются медленно. Конечно, на это нужны гранты, а если у тебя нет хороших статей, то нет и гранта, а статей нет опять же из-за отсутствия гранта. В общем, получается замкнутый круг. Но есть способ из него выбраться: нужно придумать что-то новое, интересное, тогда ты найдешь людей, которые тебя поддержат и скажут: «А давай мы вместе сделаем этот проект». Потому что специалистов, владеющих технологиями и приборами, на самом деле много, а вот идей не хватает.

Микроорганизмы можно использовать для получения электричества из органических отходов. Эти процессы сейчас активно исследуются во всем мире

Я бы очень хотела донести до людей, как разнообразна и прекрасна наша наука микробиология. В своих выступлениях перед студентами, которые еще только выбирают кафедру, я часто говорю: если вы еще не знаете, чего вам хочется в жизни, смело идите в микробиологию, потому что там каждый найдет свое. Хотите — будете заниматься геномикой, хотите — чисто прикладными вещами, а если душа просит приключений, то добро пожаловать в наши экспедиции. Думаю, мне удалось преуспеть в популяризации микробиологии, ведь к нам с каждым годом приходит все больше желающих. В этом году конкурс на кафедру увеличился вдвое — и, кстати, юношей среди претендентов как никогда много. Мы будем тщательно выбирать для них руководителей как на кафедре в МГУ, так и в Институте микробиологии им. С.Н. Виноградского, с которым активно сотрудничаем. Главное — выполнить все, что мы пообещали нашим студентам. ■

Беседовала Янина Хужина

АСТРОНОМИЯ

Иные луны

Гонка, цель которой — открыть
первый спутник планеты вне
Солнечной системы, уже стартовала

Ребекка Бойл



ОБ АВТОРЕ

Ребекка Бойл (Rebecca Boyle) — удостоенная премий независимая журналистка из Колорадо-Спрингс, штат Колорадо. Ее готовящаяся к выходу в свет книга «Прогулка с Луной» (*Walking with the Moon*) исследует взаимоотношения Земли с ее спутником на протяжении всей их истории.



В 1655 г. голландский астроном Христиан Гюйгенс соорудил телескоп-рефрактор собственной конструкции и направил его на Сатурн. Он думал, что планета окружена одним сплошным кольцом, и собирался наблюдать за его наклоном, который, как уже знали астрономы, за несколько лет изменился. Вместо этого в видоискателе он увидел нечто неожиданное: огромный спутник, который теперь называют Титаном. Сатурн стал третьей планетой после Земли и Юпитера, о которой было известно, что она имеет спутник. Даже если кольца Сатурна были редким явлением, очевидно, спутники в нашей Солнечной системе были делом обычным.

В 2007 г. сеть автоматических телескопов наблюдала звезду в созвездии Кентавр (Центавр) на расстоянии от нас примерно в 433 световых года. Звезда заметно потускнела и оставалась такой в течение как минимум 54 дней, а самый слабый сигнал был зафиксирован в районе 29 апреля. В 2012 г. астрономы определили, что у этой звезды есть огромная газовая планета размером с Сатурн, на орбите которой находится впечатляющая группа из 37 колец. Так же как и Сатурн, эта планета, получившая название *J1407b*, имеет разрыв в системе своих колец. Ученые предположили, что разрыв этот может указывать на существование там спутника, масса которого примерно равна массе Земли.

До конца XX в. единственными известными планетами были те семь, у которых с Землей общее Солнце. Ситуация начала меняться в конце 1990-х гг., когда были обнаружены первые экзопланеты, и окончательно изменилась после 2009 г., когда открыл свой объектив космический телескоп «Кеплер». Теперь мы знаем, что космос буквально кишит планетами, что планет гораздо больше, чем звезд, и что размер, местоположение и тип этих небесных

тел бывают практически любыми из того, что только можно представить. Возможно, впервые со времен Галилео Галилея, открывшего крупнейшие спутники Юпитера, и таких астрономов, как сам Гюйгенс, люди созерцают наше место во Вселенной свежим взглядом. Нам еще только предстоит найти далекую планету, которая выглядит так же, как наш дом, или подтвердить, что вокруг экзопланеты обращается ее собственный спутник. Но мы к этому все ближе и ближе.

Астрономы начали строить предположения о существовании экзоспутников в начале 2000-х гг., после того как в свете далеких звезд начали мигать несколько экзопланет, а поиски после 2018 г. выявили несколько перспективных кандидатов. Обнаружение спутника за пределами Солнечной системы, по видимому, будет означать еще одну переориентацию нашего видения космоса. Мы узнаем, вездесущи ли спутники или редки; какие они обычно — большие или маленькие по сравнению со своими планетами; часто ли они образуются вместе со своими планетами или рождаются позднее в катаклизмах; и появляются они группами или обычно летают в одиночестве.



Луна (снимок с Международной космической станции) оказала большое влияние на формирование нашей планеты и сделала ее пригодной для жизни

Мы сможем понять, уникальна ли наша Солнечная система и насколько особняком стоит Земля с ее огромной одинокой Луной.

«Каждый раз, когда мы наблюдаем экзопланету, на ум приходит, что это зеркало нашей собственной истории, — говорит Алекс Тичи (Alex Teachey), научный сотрудник Института астрономии и астрофизики Академии Синика (национальной академии Тайваня) и один из первооткрывателей возможного спутника у экзопланеты *Kepler-1625b*. — В чем мы такие же, как и все, и чем отличаемся от других? Точно так же, как мы увидели эти отличия, наблюдая экзотические системы экзопланет, возможно, мы будем удивлены и тем, что увидим, наблюдая экзоспутники».

Что дает нам Луна

Земля остается уникальной и в Солнечной системе и везде, куда мы уже бросили взгляд. Это единственная планета, про которую мы знаем, что на ней существует жизнь. Это единственная планета, чьи активные внутренние

структуры формируют ее внешний облик в виде тектоники плит, процесса, который сам играет важную роль в распространении и эволюции жизни. Это единственная планета с достаточно толстой атмосферой, чтобы поддерживать воду в жидком состоянии, климатом, остающимся стабильным на протяжении тысячелетий, и именно таким расстоянием от Солнца, что на ее поверхности тепло, но не слишком жарко. И условия эти существуют, по крайней мере частично, благодаря нашей Луне.

Роль Луны в истории Земли восходит к самому началу, примерно 4,5 млрд лет назад, когда планета размером с нынешний Марс столкнулась с новорожденной Землей. После катаклизма остались раскаленная продолговатая Земля и кипящая Луна. С тех самых пор Луна остывает и удаляется от Земли. Когда Луна начала удаляться, планета стала приобретать более сферическую форму, а земная кора продолжала деформироваться под действием приливной силы. Возможно, в результате деформации ранней коры начались тектонические

процессы. Вместе с отдалением Луны замедляется скорость вращения Земли, отчего каждые 100 лет наши сутки удлиняются почти на две миллисекунды.

Масса Луны достаточно велика по сравнению с земной: наша планета всего в 81 раз массивнее своего спутника — соотношение во много раз меньше, чем аналогичная величина для других спутников в Солнечной системе. Сатурн, например, в 4,2 тыс. раз тяжелее Титана. Притяжение Луны удерживает неподвижной ось вращения Земли, сохраняя постоянный угол ее наклона $23,5^\circ$ по отношению к Солнцу. Эта конфигурация защищает Землю от изменений климата на протяжении тысячелетий — в отличие от Марса, у которого отсутствуют спутники достаточно большого размера и поэтому его ось претерпевает колебания направления между крайними положениями — 0° и 60° — каждые несколько миллионов лет, что вызывает там значительные климатические изменения. Луна оказывает основное влияние на земные приливы и отливы, которые формируют береговые линии и жизнь в океанах. Скорее всего, вызванные Луной приливы оказали существенное влияние на ход эволюции, заставив первые растения и четвероногих позвоночных выйти через соленые прибрежные болота на сушу.

Луна — нечто большее, чем тихий, похожий на привидение спутник; это уже сам по себе отдельный мир, который обитатели Земли использовали и созерцали с тех пор, как первые зрячие существа взглянули на небо. Без Луны Земля не была бы Землей, так же как не было бы ни океанов, ни поэзии, ни религии, ни науки, ни кого-либо из нас.

Если непохожее ни на что прошлое Земли служит какой-либо предпосылкой, то, вероятно, экзопланеты без спутников тоже разительно отличаются от Земли. Не имеющие спутников экзопланеты, возможно, представляют собой безжизненные скалы, обреченные, как Марс, на протяжении тысячелетий изменять наклон оси вращения, замерзая или кипя и не позволяя атмосфере и жизни закрепиться на них. Сами экзоспутники, если таковые существуют, — возможно, даже более предпочтительное место для жизни, чем их планеты. Вероятно, в поисках жизни за пределами Солнечной системы потребуются сосредоточить внимание на планетах, у которых могут быть спутники, и даже на самих этих спутниках.

Хотя Гюйгенс не мог этого знать, его Титан, оранжевый шар из тумана, усеянный реками и озерами из метана и этана, выглядит совсем как планета. Он никогда не станет гостеприимным для нас или любой другой известной нам формы жизни, но на нем есть жидкость

и атмосфера, а значит, существуют шансы для смешивания ингредиентов и возникновения там жизни. Сатурн с его огромной силой гравитации и облаками аммиака никогда не станет тихой гаванью для жизни; такова же ситуация и на Юпитере, практически наполовину звезде, с его противоречащими здравому смыслу радиационными поясами и газовыми слоями, которые для нас оказались бы фатальными. Но этого нельзя сказать об их спутниках.

«На основе изучения нашей Солнечной системы мы знаем, что у юпитеров других звезд могут быть достаточно большие спутники, на которых может оказаться вода, — рассуждает аспирант Западного университета в Онтарио Крис Фокс (Chris Fox). — Если у вас есть такой юпитер в зоне жизни какой-нибудь звезды, возможно, вы увидите спутник, похожий на Землю, и на нем, возможно, существует жизнь. С учетом вероятного количества спутников не исключено, что жизнь на спутниках даже более распространена, чем на планетах».

Другими словами, экзоспутники могут как сами быть обитаемы, так и способствовать обитаемости своих планет. Их обнаружение приблизит нас к пониманию этих планет, а также и нашей собственной.

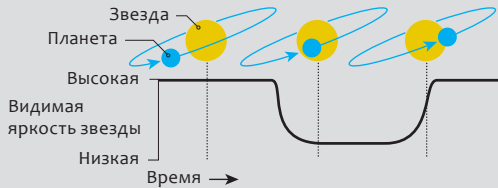
Весьма любопытный кандидат

Астрономы подозревали, что в космосе полно планет и их спутников, задолго до того, как первый свет достиг объектива телескопа «Кеплер». В 1999 г. Паола Сарторетти (Paola Sartoretti) и Жан Шнайдер (Jean Schneider), работающие в настоящее время в Парижской обсерватории, первыми предложили искать экзоспутники с помощью метода прохождений.

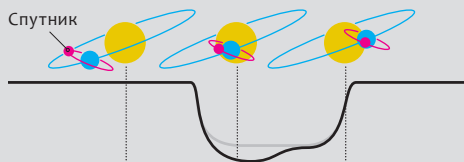
Если звезда и ее планеты лежат в одной плоскости с наблюдателем на Земле (как если бы вы рассматривали Солнечную систему сбоку, а не сверху), то звезда на короткое время тускнеет при прохождении перед ней планеты, заставляющей часть звезды. Это явление, похожее на частное затмение Солнца, называется прохождением, или транзитом. Когда прохождения повторяются регулярно, можно быть почти уверенным, что затмение вызвано обращающейся вокруг звезды планетой. Астрономы использовали этот метод для поиска планет с помощью космического телескопа «Кеплер» уже целое десятилетие. Сарторетти и Шнайдер утверждали, что спутники, обращающиеся на больших расстояниях от своих планет, также можно обнаружить этим способом, если во время прохождения спутник располагается в стороне от планеты. Звезда, возможно, потускнеет больше, чем обычно, или даже дважды, если орбита спутника проходит на достаточно большом расстоянии

Метод прохождения

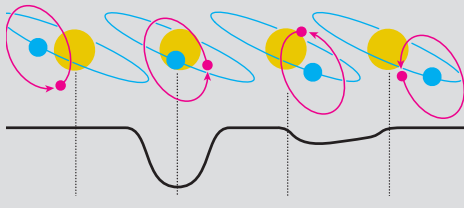
Если планета проходит между своей звездой и Землей, она немного ослабляет свет звезды, который доходит до наших телескопов. Этим методом открыты большинство известных экзопланет.



Возможно, так же проявляются и спутники. Если планета и ее спутник ориентированы так, как показано на рисунке, звезда во время прохода планеты может тускнеть больше, чем обычно, поскольку спутник также блокирует свет.



Звезда может потускнеть даже дважды, если орбита спутника удалена от планеты на достаточно большое расстояние.

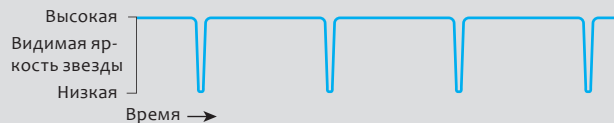


Как обнаружить экзолуну

Астрономы все еще пытаются привыкнуть открывать планеты у других звезд, но некоторые ученые уже лелеют мечты обнаружить спутники вокруг этих чуждых нам планет. За последние годы несколько научных групп объявили о предполагаемом обнаружении экзоспутников, но ни одно из открытий не было подтверждено. Ученые искали эти далекие спутники двумя основными способами: наблюдали, как тускнеет звезда, когда планета и ее спутник проходят прямо перед ней, и пытались обнаружить признаки того, что спутник заставляет свою планету колебаться.

Изменения времени прохода

Даже если экзоспутник расположен таким образом, что не заслоняет свет звезды, астрономы все равно могут его обнаружить, зафиксировав, как картина прохождения планеты изменяется с течением времени. Часто прохождения повторяются с точностью метронома.



Но иногда прохождение начинается чуть раньше или позже, чем ожидалось. Такая картина прохождения может говорить о том, что спутник, обращающийся вокруг планеты, заставляет ее немного покачиваться вокруг их общего центра масс. Эти колебания изменяют временные характеристики прохождения планеты и смазывают точную картину изменения приходящего к нам светового потока.



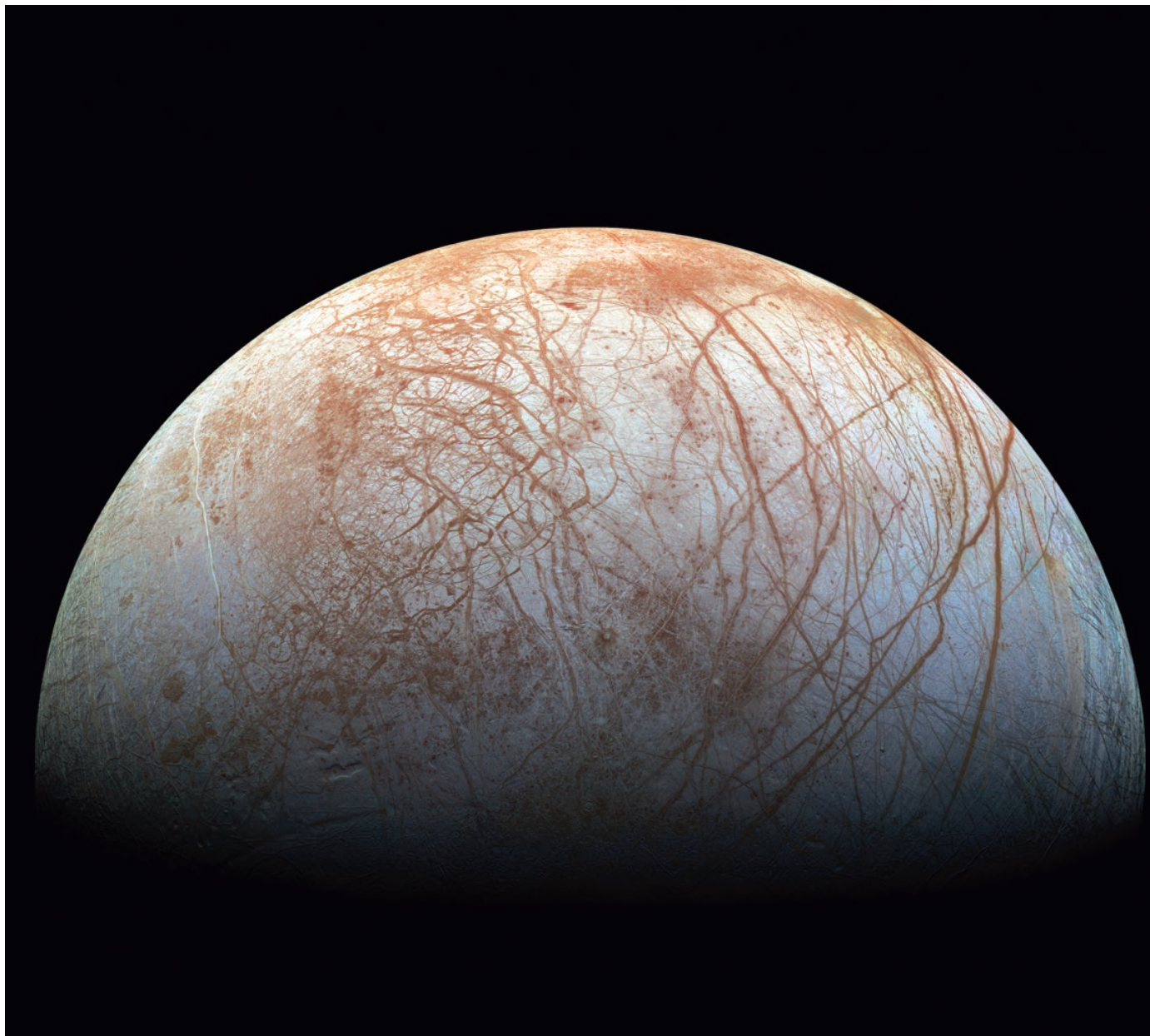
от планеты. Если во время прохождения вы находитесь на планете, то фаза удаленного спутника должна быть в районе первой или последней четверти; но во время полнолуния или новолуния, когда спутник, планета и Земля расположены на одной прямой, заметного сигнала от спутника не будет.

Сарторетти и Шнайдер предположили, что даже если экзоспутники обращаются близко к своим планетам, что делает вторичное затемнение невозможным, то астрономы все равно смогут обнаруживать спутники, наблюдая за тем, как повторяющийся рисунок прохождения планеты меняется со временем. Часто прохождения повторяются с точностью метронома. Но иногда они немного отклоняются от расписания: прохождение начинается или заканчивается чуть раньше или позже, чем ожидали ученые, — эффект, называемый изменением графика прохождений. Это может быть вызвано тем, что вокруг звезды обращаются и притягивают друг друга другие планеты, но это также может произойти, когда у планеты большой спутник.

Чтобы понять почему, сначала полезно принять во внимание, что Луна вращается не строго вокруг нашей планеты. Правильнее сказать так: оба небесных тела вращаются вокруг их общего центра масс. Центр масс расположен внутри Земли, потому что наша планета гораздо массивнее Луны. (Точнее, центр масс расположен в земной мантии и не совпадает с центром гравитации Земли.) В результате при движении вокруг Солнца Земля чуть-чуть раскачивается. Именно такие колебания и предложили искать Сарторетти и Шнайдер.

В 2017 г. Тичи и Дэвид Киппинг (David Kipping), астроном из Колумбийского университета, проанализировали данные телескопа «Кеплер», чтобы найти хоть какие-нибудь признаки того, что один из спутников влияет на свет, идущий к нам от звезды. Они проанализировали около 300 планет в надежде найти их спутники и нашли только одного кандидата — *Kepler-1625b*.

Они запросили время наблюдения на космическом телескопе «Хаббл» и были удивлены, когда им его предоставили, вспоминают оба. Затем



На спутнике Юпитера Европе есть океан, который, как предполагают ученые, создает условия, благоприятные для жизни

в течение года они изучали данные «Хаббла»; часть этого времени была потрачена на изучение того, как их использовать. Когда Киппинг и Тичи закончили анализ, их наблюдения с телескопа «Хаббл» показали, что прохождение планеты началось раньше, чем должно было быть, а это означает, что рядом с ней есть спутник. По данным за пять лет, время прохождения планеты изменилось примерно на 20 минут. «Мы знаем, что эту планету что-то толкает, — говорит Киппинг, — и мы полагаем, что это ее спутник».

Тичи и Киппинг разместили свою статью на сервере препринтов в начале 2018 г., и в итоге в октябре 2018 г. она была опубликована

в журнале *Science Advances*. Они говорят, что данные подтверждают существование спутника размером с Нептун у планеты *Kepler-1625b*, которая сама по себе во много раз больше Юпитера. Киппинг и Тичи не стали заявлять об открытии. «Я думаю, что люди были разочарованы тем, как мы об этом сообщили, — объясняет Тичи. — Они подумали, что мы оба пытаемся получить признание за открытие и в то же время как бы прикрываем свои тылы, потому что не заявляем о нем в полной мере. Я понимаю разочарование людей: все же есть открытие или нет? Но остается еще много неизвестных нам неизвестных».

Сразу после их первоначального сообщения в гонку включились и другие астрономы. Рене Эллер (René Heller), астроном из Института исследований Солнечной системы Общества Макса Планка в Геттингене, воспроизвел часть работы Тичи, но не нашел достаточных свидетельств присутствия спутника. Лаура Крайдберг (Laura Kreidberg), изучающая атмосферы экзопланет, не смогла подтвердить ключевую часть результатов. Крайдберг, в настоящее время директор недавно образованного Отдела физики атмосфер экзопланет Института астрономии Общества Макса Планка в Хайдельберге, вспоминает свою дружескую, но несколько неловкую беседу с Тичи, состоявшуюся через несколько месяцев после публикации его статьи. «Алекс так упорно трудился над этим, и я не хочу преуменьшать значение того, что он сделал, — рассказала она. — Я налетела на него, имея за спиной несколько лет опыта работы с этим инструментом. Я желаю успеха Алексу. Мы оба хотим, чтобы там оказался спутник. Это было бы так круто!»

Гонка

Спустя несколько месяцев после сообщения Киппинга и Тичи внимание к экзоспутнику только возросло. Уже скоро различные группы ученых бросились самостоятельно изучать данные с «Кеплера», пытаясь найти изменения времени прохода, которые могли бы указывать на присутствие спутников. Другие обратились к таким инструментам, как *VLT-SPHERE* («Спектро-поляриметрический прибор Очень большого телескопа для высококонтрастного исследования экзопланет»). Сесилия Лаццони (Cecilia Lazzoni), недавно защитившая диссертацию в Падуанском университете, утверждала, что обнаружила гигантский экзоспутник, используя данные от *SPHERE*. В статье, опубликованной в журнале *Astronomy & Astrophysics*, она описала ее как спутник коричневого карлика — тусклого объекта очень малой массы, между планетой и звездой, который во много раз больше Юпитера, но не сжигает водород. Планета Лаццони и находящееся рядом с ней небесное тело, возможно, больше похожи на двойные планеты-гиганты, чем на планету и ее спутник. Если таких объектов достаточно много, астрономам придется уточнить определение планеты и ее спутника.

В 2019 г. Фил Саттон (Phil Sutton) из английского Университета Линкольна повторно проанализировал данные супер-Сатурна *J1407b*. Планету и ее кольца первыми обнаружили Эрик Мамаек (Eric Mamajek), ныне работающий в Лаборатории реактивного движения NASA, и несколько его коллег. Саттон хотел

найти доказательства существования у нее спутников, орбита которых проходит снаружи кольца, как у большинства спутников Сатурна, поэтому он решил определить, «слеплены» ли 37 колец планеты *J1407b* аналогичным образом. Он не смог найти никаких свидетельств того, что спутники проделали разрывы в кольцах, а вместо этого обнаружил, что один из них, скорее всего, разорвет диск на части. «Мы все воодушевлены тем, что, возможно, действительно что-то нашли», — рассказывает Саттон. Но повторный анализ часто рассеивает надежды: «Чтобы это подтвердить, нужно очень сильно исхитриться».

Вслед за этим прошлым летом Фокс из Западного университета перелопатил другие данные с «Кеплера». Он и его научный руководитель Пол Вейгерт (Paul Weigert) тщательно изучили 13 планет, обнаруженных «Кеплером», и нашли среди них восемь с изменяемым временем прохода, что можно объяснить влиянием экзоспутников. Но, как отметил Фокс, эти изменения могут быть вызваны и некой иной причиной. Вариантов здесь множество — от изменения звездной активности, например вспышек, до влияния другой планеты. «В ряде случаев нам удалось сопрячь картину изменения времени прохода со спутником, но во всех случаях мы могли объяснить это присутствием второй планеты», — говорит он.

Тичи подверг работу критике, когда летом Фокс выложил ее на сервере препринтов, и столь же ревностно критиковал отклики на нее, в которых утверждалось, что Фокс говорит о спутниках, тогда как на самом деле речь шла о сценариях, в которых неясно, спутник это или планета. По словам Тичи, в молодой и быстрорастущей области, особенно в той, где ставки для стремительно продвигающих карьеру открытий высоки, болезни роста неизбежны. «Мы не собираемся перекрывать кислород людям, занимающимся поисками экзоспутников, и меньше всего хотим производить впечатление привратников, — говорит он. — Но в то же время это часть игры. Мы намерены поставить под сомнение выводы, которые, на наш взгляд, не подтверждены доказательствами». Статья Фокса недавно была принята к публикации в *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

В ноябре прошлого года Киппинг организовал первую в истории конференцию, посвященную экзоспутникам, — неформальное общение в интернете с помощью приложения *Zoom*, собравшее около 80 ученых со всего мира. Ученые обсудили новые методы обнаружения, теории формирования спутников и колец у экзопланет, новые ограничения на размер экзоспутников и то, какие небесные тела

можно считать таковыми, а также связанные с этим вопросы. «Я считаю, как сообществу нам нужно быть немного организованнее, чтобы иметь больше шансов», — говорит Кишпинг.

Надежное обнаружение пока ускользает от нас отчасти потому, что все астрономы требуют от своих телескопов и своих данных слишком многого. Едва заметное уменьшение яркости в результате прохода планеты перед диском своей звезды зачастую достаточно не просто заметить само по себе. В сравнении с этим измерение уменьшения или увеличения времени прохода всего на несколько мгновений (с учетом того, что изучаемые объекты находятся от нас на расстоянии в сотни световых лет) — занятие мучительно трудное.

По словам Крайдберг, она раздосадована тем, что не смогла понять, почему они с Тичи не смогли прийти к одному и тому же ответу, используя одни и те же данные телескопа «Хаббл». Оба применяли общие методы обработки данных, и она старалась в точности повторить его шаги, но не смогла прийти к тем же результатам, что и он. «Я сожалею только о том, что мы не смогли понять, в чем разница, — говорит она. — Вывод для меня заключался в том, что мы действительно раздвигаем границы возможного использования "Хаббла". Он был разработан, чтобы изучать далекие тусклые галактики, а не находящиеся поблизости планеты со спутниками. Мы делаем максимум возможного, обрабатывая данные, но выделить сигнал — высокое искусство».

Другие проблемы относятся к геометрии. Из законов Кеплера (Иоганна Кеплера, который открыл правила, управляющие движением планет, и в честь которого назван телескоп для поиска планет) и Ньютона следует, что орбиты спутников более стабильны на определенном расстоянии от их планет, называемом «радиусом Хилла». Чем ближе орбита планеты к ее звезде, тем больше вероятность, что гравитация звезды прервет движение спутника по орбите, направив его по спирали к планете или выбросив прочь за пределы звездной системы. Но в данных, собранных «Кеплером», «Хабблом» и другими обсерваториями, обычно запечатлены планеты, обращающиеся недалеко от своих звезд, — часто очень близко, даже ближе, чем Меркурий от Солнца. Хотя обнаружить эти планеты немного проще, чем более удаленные, они с большей вероятностью могут оказаться без спутников. «Если взять планеты, которые проходят перед дисками своих звезд, мы увидим, что влияние их гравитации значительно ослаблено и вероятность иметь собственный спутник у них гораздо меньше, — объясняет Стивен Кейн (Stephen

Kane), астрофизик-планетолог из Калифорнского университета в Риверсайде. В 2017 г. он опубликовал статью, в которой утверждал, что компактные планетные системы, такие как система семи планет, схожих с планетами земной группы, звезды TRAPPIST-1, вряд ли вообще имеют спутники. У планет, движущихся на больших расстояниях от своих звезд, таких как Юпитер и Сатурн, вероятность найти спутники выше, отмечает Элис Квиллен (Alice Quillen), астроном из Рочестерского университета, изучавшая супер-Сатурн *J1407b*. Когда планета находится на большем расстоянии от звезды, гравитация звезды в меньшей степени будет вмешиваться в гравитацию планеты, давая возможность спутнику оставаться на орбите. Если находящиеся далеко от своих звезд экзопланеты по размеру и составу схожи с внешними планетами Солнечной системы, они также с большей вероятностью могут захватывать обломки планет, сбившиеся с пути астероиды и карликовые планеты. Спутник Нептуна Тритон, как полагают, — это похожая на Плутон карликовая планета, захваченная им из далекого пояса Койпера, которая оказалась в объятиях Нептуна уже после формирования Солнечной системы.

Но большие, удаленные от звезды планеты трудно найти, отчасти потому, что им требуется много времени, чтобы облететь вокруг своих звезд, — один год на Юпитере, равный одному обороту вокруг Солнца, занимает почти 12 земных лет, а это означает, что астрономам придется наблюдать за такой планетой более двух десятилетий, прежде чем будет зарегистрирован характерный сигнал. И их трудно заметить, потому что легко спутать с другими объектами. Периодические ослабления яркости света постоянной интенсивности звезды с одной и той же вероятностью могут быть вызваны как звездными парами, которые время от времени перекрывают друг друга, так и внешними объектами планетной системы. «Вы вряд ли найдете планеты вдалеке от звезды, потому что их слишком легко спутать с закрывающими друг друга двойными звездами, — говорит Квиллен. — Нужно будет потратить слишком много времени на то, чтобы избавиться от ненужной вам всячины».

Звезды сами иногда могут внести путаницу в регистрируемые сигналы. Солнце оказалось особенно спокойной звездой; другие звезды, как правило, более активны, выбрасывая из своих недр вспышки огня и излучения, на них появляются пятна, которые также могут повлиять на их видимую поверхностную яркость. «Трудности измерения яркости звезды заключаются в том, что если вы слишком сильно повысите

точность измерения, то упретесь в звездную активность, — объясняет Кейн. — Шум, производимый звездой, будет сравним или окажется даже большим, чем ожидаемый сигнал от спутника. По сути, это создает потолок, выше которого вы не можете подняться, и это действительно серьезная проблема».

Не пасуя перед трудностями, некоторые астрономы обращаются к хитроумным математическим методам и новаторским способам наблюдений. Апурва Оза (Aurva Oza), преподаватель Бернского университета в Швейцарии, ищет Ио. Вулканический спутник Юпитера можно увидеть в бинокль или в скромный телескоп — это один из четырех спутников, которые Галилео Галилей наблюдал в 1609 г. Но если смотреть на Ио с помощью чувствительных инструментов, это один из самых очевидных объектов на небе. Известно, что спутник выделяет натрий и калий, которые в огромных количествах выбрасывает в космос, в то время как гравитация Юпитера разрывает его внутренности, а на поверхности Ио извергаются вулканы. По словам Озы, экзосфера Ио может простираться на расстояние, чуть ли не в 500 раз большее радиуса Юпитера. Более того, характерные признаки спутника будут хорошо видны независимо от того, где он находится; а астроном, изучающий проходную планету, не должен будет беспокоиться о фазе этого экзоспутника. Даже если экзо-Ио будет находиться за планетой, огромное плазменное облако юпитерианской луны все равно можно будет обнаружить с помощью подходящих инструментов. «Если этот газ распылен повсюду, все будет окутано им и вы увидите спутник во время транзита», — говорит Оза.

Он добавляет, что спектрографы нескольких телескопов уже способны обнаруживать летучие газы внутри звезд и вокруг них. Некоторые обнаружили натрий, калий и характерные признаки других элементов, присутствие которых часто трудно объяснить. «Недостающим фактором может оказаться спутник, — говорит Оза. — Когда размышляешь в этом направлении, это уже не кажется таким диковинным». Однако он отмечает, что экзо-Ио вряд ли станет местом, где стоит искать экзобиологию в любом виде: «Мы не ищем здесь условия, пригодные для существования жизни. Мы ищем взрывоопасную среду, а это большая часть Вселенной».

Путь вперед

Астрономы надеются, что космический телескоп «Джеймс Уэбб», запуск которого в настоящее время запланирован на октябрь, поможет охотиться за экзоспутниками с большей точностью. «Кеплер» был сконструирован для поиска

планет размером с Землю вокруг звезд, похожих на Солнце, поэтому объекты меньше Земли обнаружить бывает трудно. Ученые широко использовали космический телескоп «Спитцер», но он был выведен из эксплуатации в январе 2020 г. Сегодня мало какие из имеющихся на Земле или в небесах инструментов способны обнаруживать экзоспутники, поэтому астрономы полагаются на более совершенные методы обработки данных — и готовятся ждать.

«Часть нашей работы по-прежнему заключается не только в поиске этих объектов, но и в придумывании более эффективных способов их поиска, — говорит Тичи. — Люди думают, что открытие — это момент озарения. Но это скорее похоже на: "Посмотрим, не провалит ли он этот тест. И этот тест тоже". А потом вы восклицаете: "Ну вот, вроде бы держится!"»

Наземные обсерватории, такие как *ELT* (*Extremely Large Telescope*, Чрезвычайно большой телескоп), строящийся в чилийской пустыне Атакама, тоже могут при определенных условиях обнаруживать экзоспутники. Европейский космический телескоп *PLATO* (*PLANetary Transits and Oscillations of stars*, Прохождения планет и колебания звезд), запуск которого запланирован на 2026 г., возможно, также поможет в поисках. В более далеком будущем спутники, такие как *LUVOIR* (*Large UV Optical IR Surveyor*, Большой ультрафиолетовый оптический инфракрасный исследователь), который планируется запустить где-то в середине 2030-х гг., по-видимому, предоставят отличные возможности для охоты на экзолуны. Но от всех этих проектов нас отделяют еще годы.

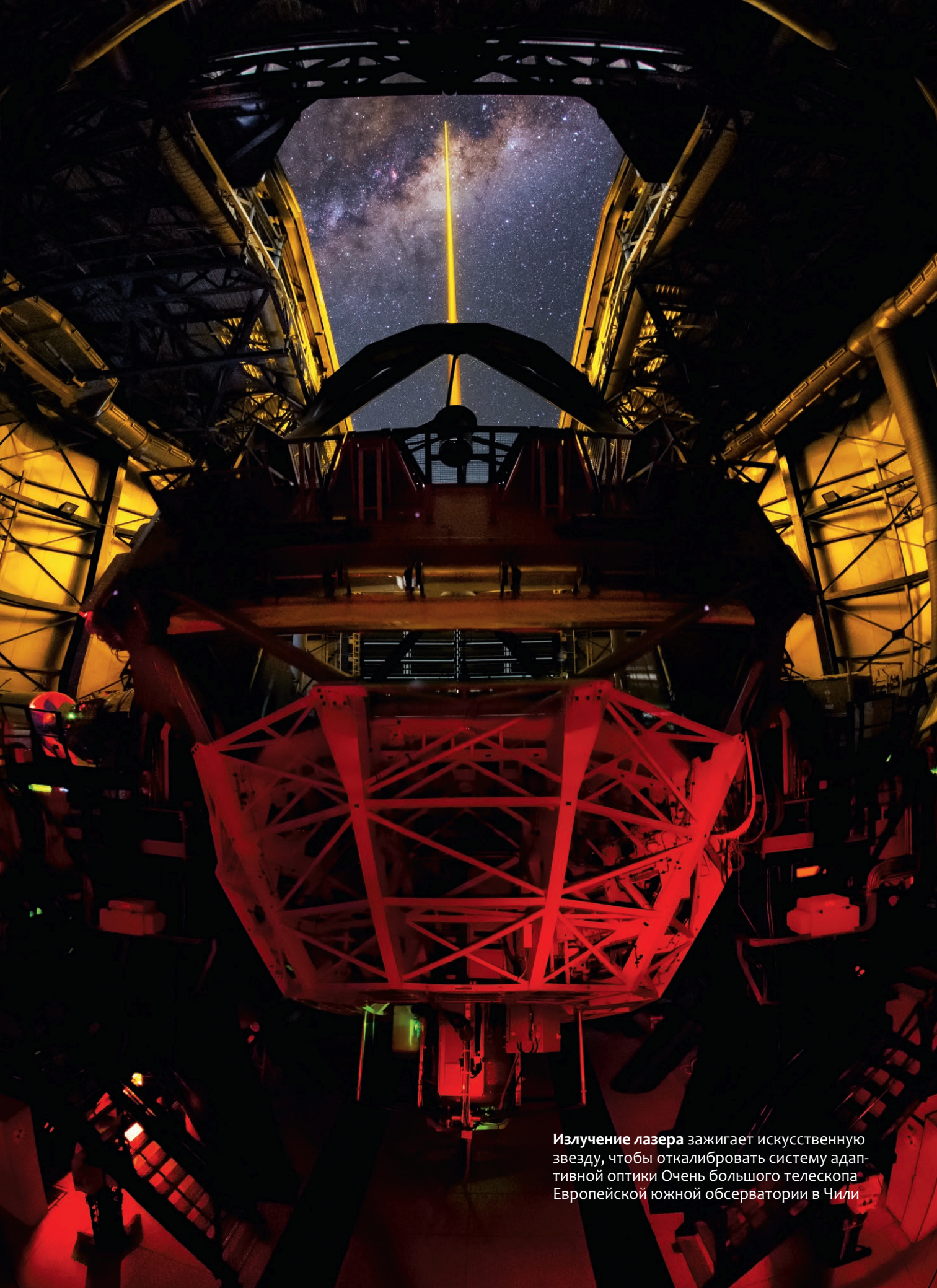
«Пока не полетит "Джеймс Уэбб", ситуацию с экзоспутниками можно представить так: "Хаббл" или пропал», — говорит Киппинг. Между тем он надеется, что быстро разрастающееся сообщество исследователей экзоспутников продолжит поиск новых стратегий работы с данными, которые уже получены. Крайдберг надеется также, что «Джеймс Уэбб» позволит обнаружить сигналы экзоспутника, но признает, что до окончательного открытия, возможно, предстоит еще долгий путь.

«Это передний край, — говорит Крайдберг. — Выяснение того, что мы знаем и насколько хорошо мы это знаем, — эволюционный процесс. Чтобы изучать экзопланеты, нужно быть оптимистом». Похоже, это касается и экзоспутников. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Биллингс Л. Поиск жизни на далеких лунах // ВМН, № 3, 2014.



Излучение лазера зажигает искусственную звезду, чтобы откалибровать систему адаптивной оптики Очень большого телескопа Европейской южной обсерватории в Чили

Видеть без ИЗЪЯНОВ

Инструмент, созданный для астрономии, обретает новую жизнь в борьбе с космическим мусором и обеспечивает квантовое шифрование

Фрэнсис Беннет, Селин д'Оржевиль и Тони Травуйон

ДЛЯ АСТРОНОМОВ это волшебный момент: вы смотрите в монитор — и размытое изображение космологического объекта становится более резким, демонстрируя новые детали. Мы называем это «замыканием петли», имея в виду петлю обратной связи адаптивной оптики — инструмента, который позволяет телескопам исправлять размытость изображения, вызванную турбулентностью атмосферы. По сути, адаптивная оптика заставляет звезды перестать мигать, сводя на нет влияние воздуха между нами и космосом, чтобы превратить размытое изображение в четкое.

Как-то ночью в прошлом году наша научная группа в Австралийском национальном университете завершила цикл создания новой системы электронного фотографирования, предназначенной для детального изучения космического мусора. Сидя в зале управления нашей обсерватории на горе Стромло, откуда открывается вид на столицу Канберру, для этого первого испытания мы выбрали метеорологический спутник. Это была легкая мишень: его большой корпус и солнечные

батареи ни с чем не спутаешь, что давало хорошую возможность проверить рабочие характеристики нашей системы.

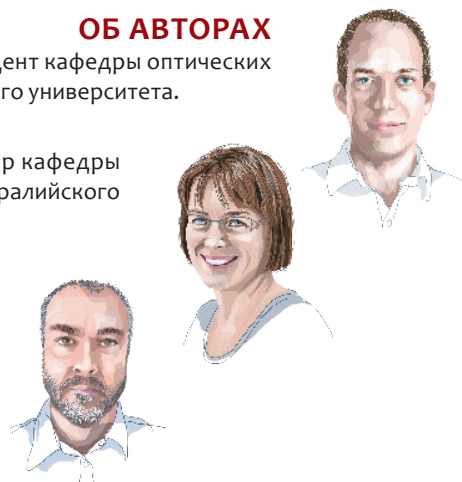
Для некоторых из нас это был первый раз, когда мы использовали телескоп, чтобы наблюдать что-нибудь, что не было звездой, галактикой или другим космическим явлением. Этот спутник — один из тысяч созданных руками человека объектов, летающих вокруг нашей планеты. Рой космических аппаратов, часть из которых активны,

ОБ АВТОРАХ

Фрэнсис Беннет (Francis Bennet) — доцент кафедры оптических приборов Австралийского национального университета.

Селин д'Оржевиль (Céline d'Orgeville) — профессор кафедры астрономии и космического приборостроения Австралийского национального университета.

Тони Травуйон (Tony Travoignon) — доцент кафедры астрономии и измерительной аппаратуры для научных исследований Австралийского национального университета.



а большинство нет, создает все больший риск чрезмерной скученности на околоземных орбитах. Наше испытание проходило в рамках программы по созданию систем для решения проблемы космического мусора и сохранения этих орбитальных путей для будущего использования. Это одно из нескольких новых направлений применения адаптивной оптики, которая традиционно используется для астрономических наблюдений, преследующих различные цели. После более чем трех десятилетий совершенствования этой техники астрономы поняли, что они могут применить свой опыт для решения любой задачи, требующей отправки или приема фотонов света между космосом и поверхностью Земли.

Борьба с атмосферой

Слой газа между Землей и остальным космосом поддерживает нашу жизнь, но при этом воздух изменяет путь любого фотона, который проходит через него. Винной всему атмосферная турбулентность, вызванная перемешиванием воздуха, имеющего разную температуру. Путь, по которому идет свет, искривляется, или, как говорят, свет преломляется, проходя через различные виды среды, поэтому соломинка в стакане с водой выглядит так, как будто под водой она наклонена под другим углом, чем над ней: когда свет, отражающийся от соломинки, перемещается из воды в воздух, направление его распространения изменяется. То же самое происходит, когда свет проходит через воздух с разной температурой. Когда свет переходит из теплого воздуха в холодный, его скорость уменьшается и направление распространения меняется.

Именно из-за этого эффекта мерцают звезды, а астрономам трудно получить четкие снимки неба. Количественно мы оцениваем влияние

атмосферной турбулентности с помощью параметра, называемого «видимость», который описывает угловой размер размытого пятна звезды при наблюдении с помощью наземного телескопа. Чем сильнее турбулентность атмосферы, тем хуже видимость. В хорошем месте, на высокой горе, где турбулентность низкая, видимость обычно составляет 0,5–1,0", то есть разрешающая способность любого телескопа ограничена величиной в этом диапазоне. Проблема в том, что современные телескопы обладают разрешением значительно более высоким. С чисто оптической точки зрения разрешение телескопа определяется «дифракционным пределом», который пропорционален длине волны света и обратно пропорционален диаметру зеркала телескопа, собирающего этот свет. Длины волн излучения, которое мы регистрируем, зависят только от химического состава наблюдаемых нами небесных объектов, а значит, их нельзя изменить. Поэтому единственный способ строить телескопы, которые могут разрешать все более мелкие объекты, — увеличивать их диаметр. Например, телескоп с зеркалом диаметром 2 м в оптическом диапазоне может разрешать объекты размером в 0,05 угловой секунды (то есть сможет увидеть большую монету с расстояния 100 км). Но даже в очень хорошем месте при плохой видимости это разрешение ухудшится в десять раз.

Поэтому легко понять преимущества размещения телескопов в космосе, за пределами атмосферы. Однако остаются очень веские причины строить телескопы на Земле. Космические телескопы не могут быть очень большими, потому что ракеты не способны нести вес больше определенного. К тому же сложно отправлять в космос людей для их обслуживания и модернизации. Самый большой строящийся сегодня космический телескоп — это «Джеймс

Как работает адаптивная оптика

Атмосфера Земли вызывает нежелательные искажения объектов, наблюдаемых наземными телескопами. Чтобы компенсировать эти атмосферные эффекты, астрономы используют системы адаптивной оптики с деформируемыми зеркалами, которые компенсируют искажения, отчего изображения получаются более четкими.

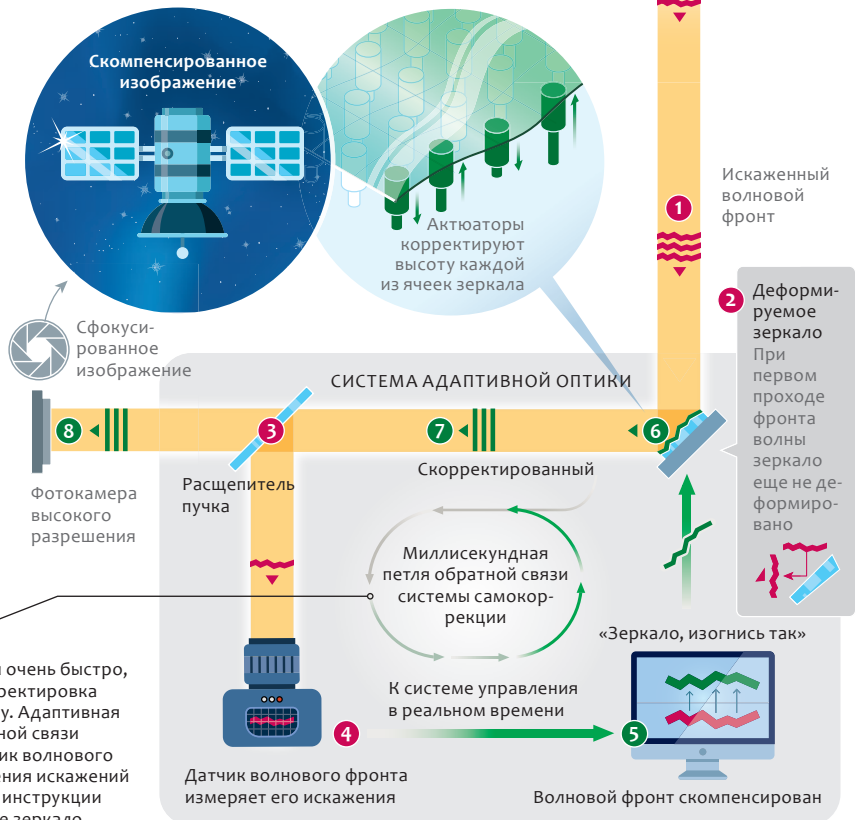


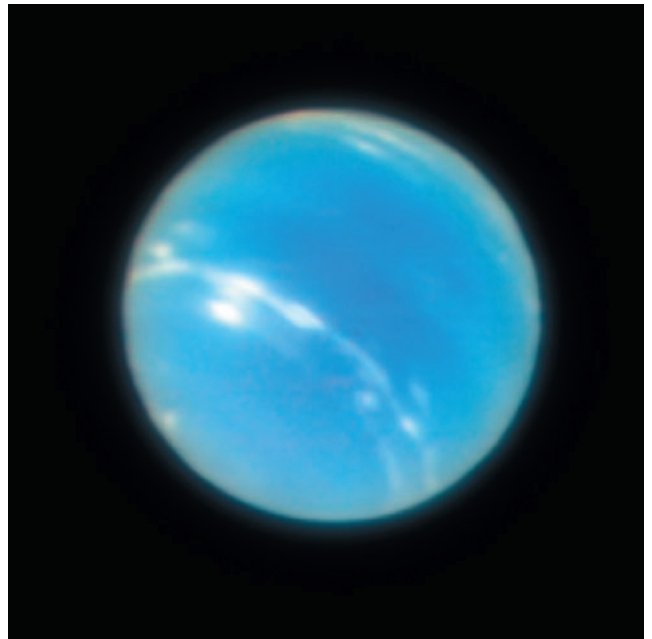
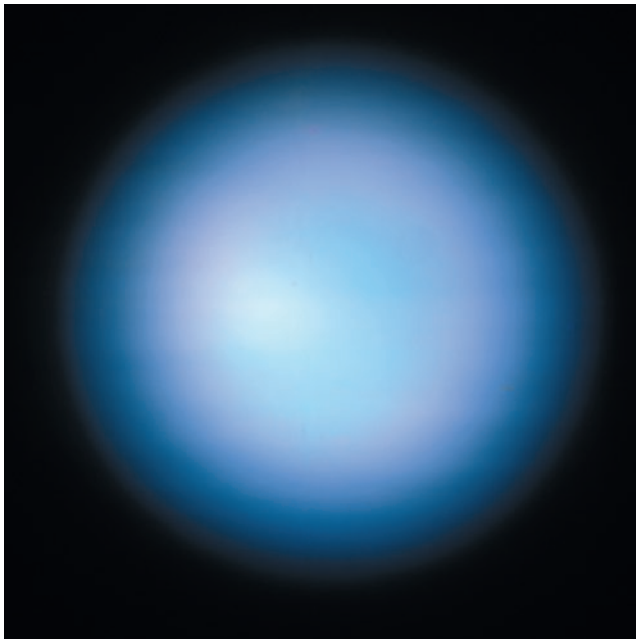
Как адаптивная оптика исправляет это

Когда световой луч попадает в систему адаптивной оптики **1**, он падает на деформируемое зеркало. Сначала еще не отрегулированное зеркало отражает искаженный волновой фронт **2**. Свет попадает на расщепитель пучка **3**, и часть его падает на датчик, который анализирует искажение волнового фронта **4**. Подобно тому как работает шумоподавление, система генерирует «инверсный» волновой фронт, который компенсирует искажение **5**, и сотни отдельных актюаторов изгибают деформируемое зеркало в соответствии с необходимой формой компенсирующей поверхности **6**. Теперь зеркало может нейтрализовать искажение падающего волнового фронта и отразить выравненный плоский волновой фронт **7**. Часть его расщепитель направляет в камеру высокого разрешения **8**, а другая часть идет в следующую корректирующую петлю.

Замыкание петли

Состояние атмосферы меняется очень быстро, поэтому системе требуется корректировка примерно каждую миллисекунду. Адаптивная оптика формирует петлю обратной связи самокоррекции, в которой датчик волнового фронта измеряет любые изменения искажений и в реальном времени отправляет инструкции компенсации на деформируемое зеркало.





В фокусе: две фотографии планеты Нептун, сделанные Очень большим телескопом (первая — до включения системы адаптивной оптики, вторая — после), демонстрируют разницу, обеспеченную этой техникой

Уэбб» с главным зеркалом диаметром 6,5 м. А диаметры зеркал крупнейших наземных телескопов составляют более 10 м. У строящегося в настоящее время Чрезвычайно большого телескопа (*Extremely Large Telescope, ELT*) диаметр главного зеркала достигнет 39 м. Наземные телескопы к тому же можно модернизировать в течение всего срока их работы, постоянно оснащая приборами последнего поколения. Но чтобы полностью использовать все возможности этих телескопов, мы должны ослабить влияние атмосферы.

Первые концепции адаптивной оптики были предложены в начале 1950-х гг., а впервые использованы в 1970-х гг. военными США, в частности для фотографирования спутников с поверхности Земли. Астрономам пришлось ждать до 1990-х гг., чтобы применить эту технику в своих обсерваториях. Адаптивная оптика включает три ключевых компонента. Первый — датчик волнового фронта, быстрая цифровая камера, оснащенная набором оптики для регистрации искажений фронта световой волны, приходящей к телескопу. Этот датчик измеряет искажения, вызванные атмосферой в реальном времени. Поскольку измерения должны успевать регистрировать быстрые изменения в атмосфере, новую карту необходимо создавать от нескольких сотен до нескольких тысяч раз в секунду. Чтобы получить достаточно фотонов при такой короткой выдержке, датчику волнового фронта требуется яркий источник света над атмосферой. Сами звезды редко

бывают достаточно яркими для этой цели. Но астрономы — люди изобретательные: они просто создают свои собственные искусственные звезды, направляя вверх луч лазера.

Этот эталонный источник света, лазерная опорная звезда — второй ключевой компонент системы адаптивной оптики. В нашей атмосфере на высоте 90 км, что значительно выше вызывающей искажения турбулентности, расположен слой толщиной в несколько километров, содержащий атомы натрия. Ученые могут возбуждать эти атомы натрия с помощью специально настроенного лазера. Атомы натрия в верхних слоях атмосферы поглощают яркий желтый свет лазера (такой же свет излучают натриевые уличные фонари во многих городах), а затем переизлучают его, создавая ослепительную искусственную звезду. Поскольку лазер прикреплен к телескопу и повторяет его движения, эта искусственная звезда всегда находится в зоне видимости датчика волнового фронта.

Теперь, когда мы можем непрерывно отслеживать форму волнового фронта, необходимо компенсировать его искажения. Это задача третьего основного компонента системы — деформируемого зеркала. Оно представляет собой тонкую отражающую мембрану, под которой находится матрица актюаторов — исполнительных механизмов, которые толкают наружу или тянут на себя мембрану для формирования неискаженного фронта отраженного света. Каждый раз когда датчик волнового фронта

проводит измерение, он отправляет полученную информацию зеркалу, которое деформируется таким образом, чтобы компенсировать искажения фазы падающего света, эффективно устраняя вызванные атмосферой аберрации. Атмосфера меняется настолько быстро, что эту корректировку фронта нужно проводить примерно каждую миллисекунду. Это серьезная механическая и вычислительная проблема. Устройство, деформирующее зеркало, ежесекундно должно совершать тысячи перемещений и должно быть сопряжено с компьютером и датчиком волнового фронта, способными работать с такой скоростью. Оно представляет собой нескольких тысяч актюаторов, каждый из которых перемещает зеркальную поверхность на несколько микрометров. Успевать постоянно поддерживать этот процесс самокоррекции с помощью обратной связи — именно это мы и называем «закрывать петлю».

Хотя этот метод сложен и трудоемок, к настоящему времени астрономы уже в значительной степени освоили адаптивную оптику и все крупные оптические обсерватории оснащены такими системами. Существуют даже специализированные версии для разных типов наблюдений. В «классической» системе адаптивной оптики используются только одна опорная звезда и одно деформируемое зеркало, что позволяют корректировать атмосферную турбулентность на довольно ограниченном участке неба. В более сложных системах, таких как МСАО (*MultiConjugate Adaptive Optics*, Много-составная система адаптивной оптики), для зондирования и корректировки большего объема атмосферной турбулентности в поле зрения телескопа используется несколько опорных звезд и несколько деформируемых зеркал. Такой подход открывает возможность для астрономических наблюдений с компенсацией атмосферных искажений в окне, которое в 10–20 раз шире, чем позволяет классическая адаптивная оптика, — но стоит это значительно дороже. В других ситуациях — например, когда астрономы хотят изучить отдельный объект, такой как экзопланета, — важным фактором становится не размер поля, а близкая к идеальной разрешающая способность. В этом случае задействуют системы, подобные Экстремальной системе адаптивной оптики (*Extreme Adaptive Optics*), в которой используются более быстродействующие датчики и зеркала с более высоким разрешением, обычно в сочетании с фильтром, блокирующим свет звезды, что позволяет получать изображения обращающихся вокруг нее тусклых

экзопланет. Сегодня мы достигли этапа, когда вполне можно ожидать, что любой телескоп будет оснащен собственной системой адаптивной оптики, и мы начинаем расширять области использования этой техники для решения задач, выходящих за пределы астрономии.

Проблема космического мусора

Как ни парадоксально, одна из этих новых областей применения — наблюдение за объектами на низкой орбите — способствовала развитию адаптивной оптики на раннем этапе. Эта область исследований, обычно называемая контролем над ситуацией в космосе, включает наблюдение и изучение искусственных и естественных космических объектов, то есть спутников и метеороидов. Законные опасения заключаются в том, что постоянно увеличивающееся количество запускаемых космических аппаратов приведет к увеличению числа столкновений между ними, в результате чего обломков станет еще больше. При наихудшем варианте развития событий может случиться каскадный эффект, что сделает некоторые ор-

Адаптивная оптика, по сути, заставляет звезды перестать мигать, сводя на нет влияние воздуха между нами и космосом, чтобы превратить размытое изображение в четкое

биты полностью непригодными для использования. Эта катастрофическая, однако достаточно вероятная ситуация называется «синдром Кесслера» по имени Дональда Кесслера (Donald Kessler), ученого NASA, предсказавшего ее еще в 1978 г.

Около 34 тыс. созданных руками человека объектов размером более 10 см летают вокруг Земли; из них только около 10% — активные спутники. Космический мусор скапливается на высотах, наиболее активно используемых для деятельности человека в космосе, в основном на низких околоземных орбитах (от 300 до 2 тыс. км над поверхностью Земли) и на геостационарной орбите (около 36 тыс. км). Хотя более крупные объекты мы можем отслеживать с помощью радаров, оптических телескопов и станций лазерного слежения, там летают еще несколько сотен тысяч обломков размером от 1 см до 10 см и еще до 100 млн обломков меньше 1 см, орбиты которых в большинстве случаев неизвестны.

Сцены столкновения в фильме 2013 г. «Гравитация» служат страшной иллюстрацией того, что может произойти, если крупный обломок столкнется, например, с Международной космической станцией. Агентство NASA сообщает, что за последние 20 лет станции приходилось выполнять примерно один маневр уклонения в год, чтобы избежать столкновения с космическим мусором, который пролетал слишком близко, и тенденция эта только усиливается: в 2020 г. было выполнено три маневра. Космический мусор способен серьезно нарушить наш нынешний образ жизни, который — и зачастую мы не имеем об этом ни малейшего представления — в значительной степени завязан на космические технологии. Безусловно, спутники необходимы для работы мобильных телефонов, телевидения и интернета, но также для функционирования системы глобального позиционирования, проведения банковских операций, наблюдений за атмосферой Земли для составления прогнозов погоды, для быстрого реагирования на стихийные бедствия, управления потоками транспорта и многих других критически важных для нашей повседневной жизни видов деятельности.

Ряд проектов направлены на очистку космоса, но все эти усилия технологически трудны, сложны в политическом отношении и довольно затратны. Тем временем некоторые ученые, в том числе наша научная группа из Австралийского национального университета, работают над разработкой стратегий снижения негативных последствий непосредственно с Земли. Работать с Земли проще и дешевле, к тому же мы можем использовать технику, которая у нас уже хорошо работает, например адаптивную оптику.

Существует несколько тонких различий между тем, как мы используем адаптивную оптику в астрономии, и тем, как мы применяем ее для контроля ситуации в космосе. Скорость спутника зависит от его удаленности от Земли. Например, МКС летит на высоте 400 км над Землей с невероятной скоростью 8 км/с и совершает полный облет планеты каждые полтора часа. Это намного быстрее видимого движения Солнца и звезд, которым благодаря вращению Земли требуются целые сутки, чтобы совершить круг над нами. Из-за такой высокой скорости, когда телескопы отслеживают спутники, кажется, что атмосферная турбулентность изменяется намного быстрее, и системы адаптивной оптики должны вносить поправки в 10–20 раз быстрее, чем при отслеживании астрономических объектов. Лазерный луч опорной звезды необходимо направить в точку немного впереди спутника, чтобы получить

данные о том участке атмосферы, в котором спутник окажется через несколько миллисекунд.

Адаптивную оптику можно использовать для отслеживания и получения изображений спутников и мусора на низкой околоземной орбите, а также для улучшения отслеживания объектов на низких, средних и геостационарных орбитах. Один из способов отслеживания космических объектов — с помощью лидаров (*от англ. LIDAR — Light Detection And Ranging, Оптическая система обнаружения и определения расстояния до объекта. По сути, это тот же радар, но работающий в оптическом диапазоне. — Примеч. пер.*). Мы посылаем в небо короткий импульс излучения лазера системы слежения (не путать с лазером для формирования опорной звезды), чтобы по времени прохождения отраженного от спутника сигнала определить точное расстояние от этого космического аппарата до Земли. В данном случае система адаптивной оптики предварительно обрабатывает лазерный луч, намеренно искажая его перед тем, как он пройдет через турбулентную атмосферу. Искажения рассчитываются таким образом, чтобы компенсировать влияние турбулентности, так что лазерный луч после выхода из атмосферы вновь становится неискаженным.

Мы надеемся, что сможем использовать этот метод не только для отслеживания космического мусора, но и чтобы уводить объекты с курса, если он ведет их к столкновению. Небольшое давление, оказываемое при отражении фотонов лазерного света от поверхности обломков, может изменить орбиту объекта с большим отношением площади поверхности к массе. Для максимально эффективного воздействия необходимо, чтобы адаптивная оптика фокусировала лазерный луч именно там, где мы хотим. Эта стратегия не уменьшит количество обломков на орбите, но может помочь предотвратить столкновения обломков с другими обломками и, возможно, отсрочит развитие катастрофического сценария Кесслера. В конечном итоге такие системы можно было бы использовать по всей планете для управления нашим космическим окружением.

Квантовая передача информации

Космическая безопасность — не единственная область, в которой адаптивная оптика может оказаться полезной. Системы шифрованной связи имеют принципиальное значение для многих направлений технического прогресса, который мы наблюдаем в последние десятилетия. В бесконтактных платежных системах, в том числе для оплаты с помощью мобильных телефонов и наручных часов, онлайн-банкинга

и электронной коммерции, везде используется высокоскоростная безопасная техника связи. Шифрование, применяемое для передачи этих сообщений, основано на трудно решаемых математических задачах, и защищает оно только потому, что современные компьютеры не в состоянии решить эти задачи достаточно быстро, чтобы взломать шифр. Квантовые компьютеры, которые, вероятно, вскоре начнут преодолевать эти проблемы быстрее, чем их классические собратья, несут угрозу традиционному шифрованию. Криптографы постоянно изобретают новые методы защиты данных, но никому не удалось создать полностью безопасный протокол шифрования. Цель квантовой криптографии — изменить эту ситуацию.

Квантовое шифрование базируется на природе света и законах квантовой физики. Основа любой системы квантового шифрования — квантовый ключ. Квантовые генераторы случайных чисел смогут обеспечить нескончаемый поток действительно случайных чисел для создания ключей, которые невозможно взломать, заменяя классические ключи, формируемые предсказуемым, а значит, поддающимся расшифровке способом. Эти ключи можно генерировать с очень высокой скоростью, а нам нужно использовать их только один раз, тем самым обеспечивается доказуемо «нераскальзываемый» шифр.

Чтобы посылать закодированное квантовым шифром сообщение на большие расстояния без оптоволоконного кабеля, мы должны иметь возможность передавать свет лазера с оптического телескопа на Земле к принимающему телескопу на спутнике и обратно. Проблема с отправкой этих сигналов та же самая, с которой мы сталкиваемся, когда используем лазер, чтобы столкнуть с орбиты кусок космического мусора: атмосфера изменяет путь передачи. Но мы можем использовать все ту же технику адаптивной оптики для отправки и получения квантовых сигналов, значительно увеличив объем передаваемых данных. Эта стратегия, вероятно, позволит системам оптической связи, которые обладают преимуществом квантовой совместимости, успешно конкурировать с большими тарелками радиочастотной спутниковой связи. Существуют и другие препятствия на пути широкого внедрения систем квантовой передачи информации — например, необходимость хранить и передавать информацию, не разрушая квантовое состояние. Но ученые активно работают над этими проблемами, и мы надеемся в конечном итоге создать безопасную глобальную квантовую сеть. Адаптивная оптика — важнейшая часть работы по осуществлению этой мечты.

Атмосферная магистраль

Нежданно-негаданно техника, создававшаяся когда-то для изучения небес, возможно, поможет нам воплотить некоторые из великих целей будущего — защитить безопасность космоса и связи. Эти новые области применения, в свою очередь, будут способствовать развитию адаптивной оптики в интересах астрономии.

Традиционно адаптивная оптика была по карману только крупным обсерваториям, в которых высокая стоимость была оправдана огромным улучшением их рабочих характеристик. Но контроль космического пространства и связь сильно выигрывают от адаптивной оптики даже на телескопах со скромными апертурами. Мы находимся в ситуации, когда все эти сообщества могут помочь друг другу. Недостаточно используемые телескопы могут обрести новую жизнь, будучи оснащены адаптивной оптикой, а те, кто отслеживает космический мусор, жаждут получить больше доступа к телескопам, чтобы иметь возможность контролировать более обширные районы неба. Что касается обсерваторий будущего, астрономы рассматривают возможность расширения технических требований к своим телескопам и инструментам, чтобы дать возможность проводить на них исследования по другим направлениям, таким как контроль ситуации в космосе и связь. Это не только укрепляет их научную базу, но и дает доступ к новым источникам финансирования, включая частные предприятия.

Мы вступаем в эпоху мультидисциплинарности, когда небо становится общим ресурсом. Повышая четкость изображений неба, мы размываем границы между всеми видами деятельности, в которых телескоп используется в качестве основного инструмента. Ученые и инженеры, создающие системы адаптивной оптики, теперь расширяют сферу своего сотрудничества и ставят себя в центр этой новой динамики.

Адаптивная оптика все чаще используется и без телескопов. Важное и в настоящее время довольно распространенное применение адаптивной оптики — использование в медицинских системах визуальной информации и в офтальмологии для коррекции искажений, вносимых при наблюдении через живые ткани и глаз. Другие области применения включают оптимальную фокусировку в промышленных лазерных инструментах и даже в противоракетных военных лазерах. Никогда еще не было более захватывающего времени для изучения потенциала адаптивной оптики в космосе и на Земле. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

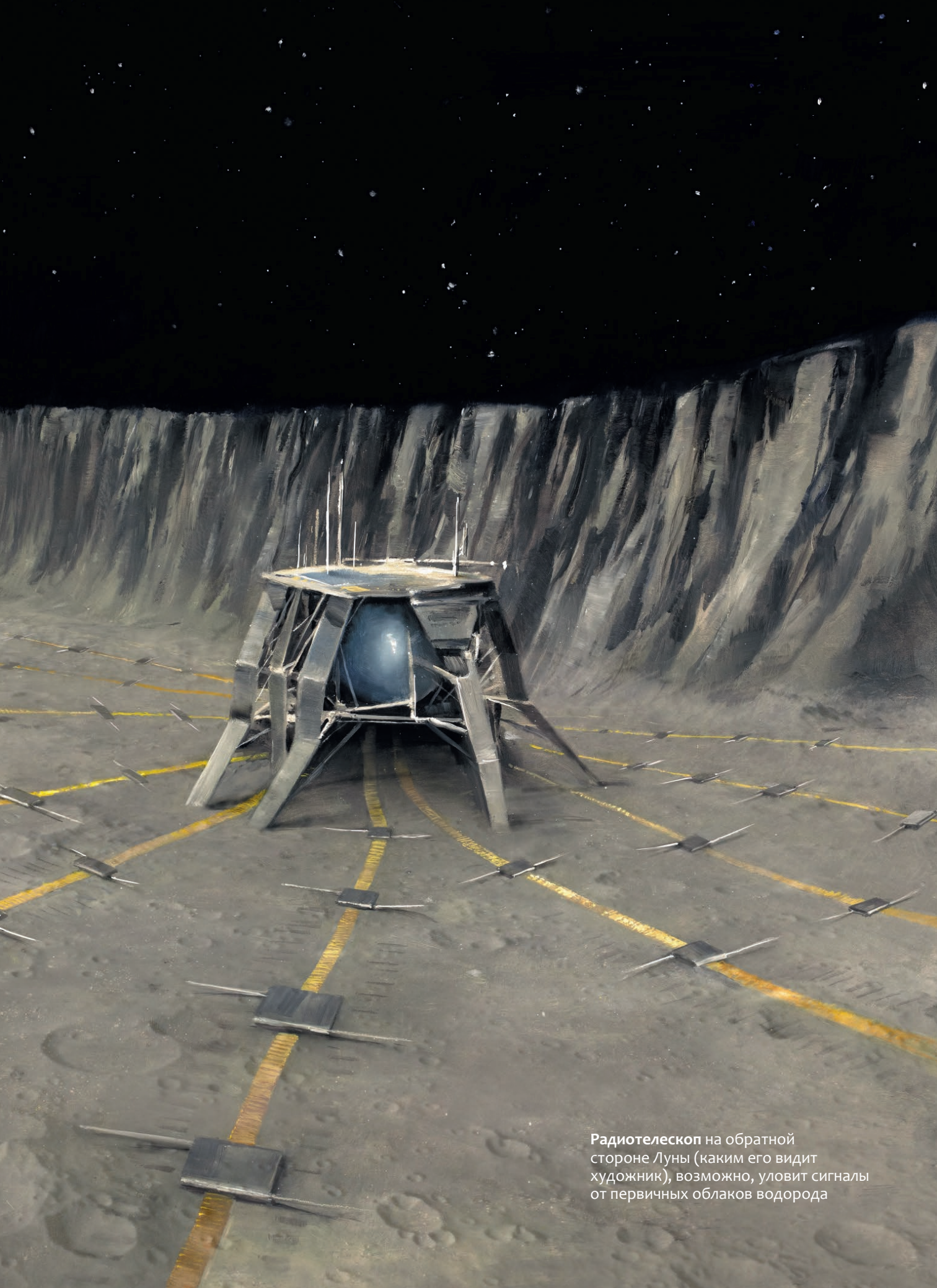


КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Взгляд с обратной стороны Луны

Новые лунные телескопы будут всматриваться в темные
века Вселенной, таящие в себе зародыши звезд

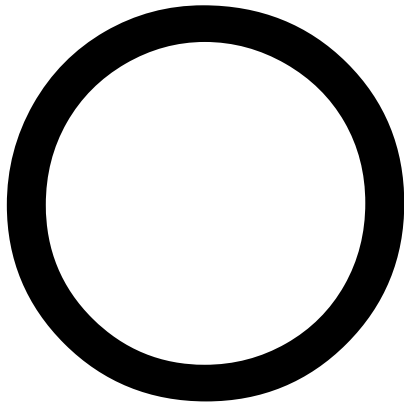
Анил Анантасвами



Радиотелескоп на обратной стороне Луны (каким его видит художник), возможно, уловит сигналы от первичных облаков водорода

ОБ АВТОРЕ

Анил Анантасвами (Anil Ananthaswamy) — автор книг «На краю физики» (*The Edge of Physics*), «Человек, который там не был» (*The Man Who Wasn't There*) и «Через две двери сразу: изящный эксперимент, который высветил тайну нашей квантовой реальности» (*Through Two Doors at Once: The Elegant Experiment That Captures the Enigma of Our Quantum Reality*).



братная сторона Луны — странная пустынная область, совершенно непохожая на привычную для нас в основном гладкую поверхность, которая видна по ночам с нашей планеты. В 1959 г. советский космический зонд «Луна-3» сделал первые снимки этой скрытой от нас местности. Вместо широких равнин на фотографиях просматривался лунный пейзаж с горами. Наблюдения, проведенные с тех пор, показали, что обратная сторона к тому же полна кратеров с изрезанными краями, внутри которых разбросано еще больше кратеров. Скоро эта территория с грубым скалистым рельефом и открывающийся прямо над ней космос будут выглядеть еще более странно: они будут кишеть радиотелескопами, смонтированными на новом поколении роботов-вездеходов и искусственных спутниках Луны.

Астрономы собираются сделать обратную сторону Луны нашим новым и самым широким окном в темные века космоса, таинственную эпоху, хранящую ранние отпечатки звезд и галактик. Наша Вселенная не всегда была заполнена этими яркими объектами, сияющими сегодня на небе. Примерно через 380 тыс. лет после Большого взрыва Вселенная остыла и образовались первые атомы водорода. Гигантские облака этого химического элемента вскоре заполнили космос. Но в течение нескольких сотен миллионов лет в отсутствие звезд все было покрыто мраком. Затем наступил «космический рассвет»: загорались и гасли первые звезды, закручивались спиралью галактик и постепенно обретала форму крупномасштабная структура Вселенной.

В темных облаках водорода, должно быть, присутствовали зародыши этой структуры, но ту эпоху невозможно исследовать с помощью оптических телескопов — света в то время просто не было. И хотя этот водород испускал длинноволновое (то есть низкочастотное) радиоизлучение, было обнаружено, что с помощью радиотелескопов

на Земле зафиксировать его практически невозможно. Наша атмосфера либо блокирует, либо искажает эти слабые сигналы; а те, что пробиваются сквозь нее, тонут в радиопылях, возникающих в ходе деятельности человека.

Ученые десятилетиями мечтали о том, чтобы изучать космические темные века с обратной стороны Луны, которая экранирована от радиоизлучения с Земли и не имеет сколько-нибудь значительной атмосферы, затрудняющей изучение космоса. Сегодня в планах космических агентств многих стран (у некоторых — в ближайшие три года) полеты на Луну с приборами для обнаружения радиоволн — и мечты астрономов станут реальностью.

«Если бы мне поставили задачу найти идеальное место для низкочастотной радиоастрономии, мне пришлось бы построить Луну, — говорит астрофизик Джек Бернс (Jack Burns) из Колорадского университета в Боулдере. — Мы сейчас наконец подошли к моменту, когда действительно собираемся разместить эти телескопы на Луне в ближайшие несколько лет».

Пульс водорода

Идея о том, что с помощью телескопов можно обнаружить нейтральный водород, восходит к 1940-м гг., когда голландский астроном Хендрик Кристофель ван де Хюлст (Hendrik Christoffel van de Hulst) предсказал, что атомы водорода могут спонтанно испускать импульсы электромагнитного излучения. Это происходит потому, что каждый атом водорода может переключаться между двумя энергетическими состояниями, испускающая или поглощающая излучение с длиной волны 21 см (то есть частотой 1420 МГц). Это излучение — «пульс водорода», и, когда облако газа разрастается до космических масштабов, сигналы могут складываться и достигать величины, которую есть возможность обнаружить.

Такие сигналы должны были впервые появиться примерно через 380 тыс. лет после Большого взрыва, когда Вселенная остыла настолько, что протоны и электроны, которые ранее заполняли пространство, соединились в атомы водорода. Помимо формирования исходного материала, из которого впоследствии возникнут все объекты, это событие имело важное дополнительное последствие, превратив Вселенную из непрозрачной в прозрачную и дав возможность реликтовому излучению, появившемуся в результате Большого взрыва, растечься по всему космосу. Теперь мы обнаруживаем это излучение — послесвечение Большого взрыва — как космическое микроволновое фоновое излучение (реликтовое излучение). После этого в течение, вероятно, первых нескольких сотен миллионов лет нейтральный водород заполнял темную Вселенную, пока не возшла космическая заря — засияли первые звезды и образовались галактики.

Темные века интересуют космологов в частности потому, что позволяют взглянуть на Вселенную тех времен, когда она была относительно нетронутой, в отсутствие воздействия каких-либо искажающих картину астрофизических эффектов. В то время распределение нейтрального водорода все еще несло на себе отпечатки первичных квантовых флуктуаций, которые были значительно усилены в результате быстрого расширения Вселенной в первые доли секунды ее истории, незапятнанные появлением звезд, галактик и скоплений галактик. Не исключено, что сигналы излучения темных веков с длиной волны 21 см несут признаки новых физических явлений или расхождения со стандартной

космологической моделью. «Это игровая площадка для проверки космологии», — объясняет Бернс.

Первые радиотелескопы на обратной стороне Луны и над ней будут достаточно простыми. Они позволят составить абрис этого покрытого тенью отрезка космического времени, который невозможно разглядеть никаким другим способом. По мере ввода в строй более совершенных инструментов сигналы на длине волны 21 см откроют все больше деталей, что позволит астрономам создавать динамические карты водородных облаков с высоким разрешением.

«Главное достоинство [излучения] нейтрального водорода в том, что это не просто моментальный снимок, как в случае реликтового излучения», — объясняет Кристиан Зарб Адами (Kristian Zarb Adami) из Оксфордского университета. Отслежи-

Не исключено, что сигналы излучения темных веков с длиной волны 21 см несут признаки новых физических явлений или расхождения со стандартной космологической моделью

вая флуктуации сигнала излучения на длине волны 21 см с течением космического времени, телескопы могут зафиксировать эволюцию ранней Вселенной на протяжении темных веков вплоть до «космического рассвета» и даже за его пределами. После рассвета наступила эпоха повторной ионизации, когда излучение первых массивных звезд и другие интенсивные астрофизические явления разогрели оставшийся нейтральный водород настолько, что он снова превратился в плазму. С наступлением этой эпохи 21-сантиметровое излучение погасло окончательно.

Пионеры обратной стороны

Несколько инструментов, играющих роль первопроходцев, уже работают. Это один из блоков китайского посадочного модуля «Чанъэ-4» на обратной стороне Луны, а также искусственный спутник Луны «Цюэцзяо», который передает сигналы с посадочного модуля на Землю. «Цюэцзяо» был запущен в мае 2018 г., а «Чанъэ-4» опустился

на поверхность Луны в январе 2019 г. «Это была первая мягкая посадка на обратную сторону Луны, — рассказывает Бернард Фойнг (Bernard Foing), исполнительный директор Международной рабочей группы по исследованию Луны (ILEWG) и планетолог Амстердамского университета. — Это было огромным успехом».

И «Чанъэ-4», и «Цюэцяо» несли радиоантенны. Но на «Цюэцяо» антенны, построенные в сотрудничестве с голландскими учеными, не раскрылись полностью, а работе единственной антенны «Чанъэ-4» мешают радиочастотные помехи электроники посадочного модуля. Будущие лунные космические аппараты для исследования темных веков Вселенной, возможно, будут иметь дополнительную защиту, чтобы минимизировать радиопомехи. Возможно также, что они развернут на поверхности Луны несколько антенн на расстоянии в десятки или сотни километров друг от друга.

Будущие лунные космические аппараты для исследования темных веков Вселенной, возможно, будут иметь дополнительную защиту, чтобы минимизировать радиопомехи

Следующая фаза подготовки к началу астрономических наблюдений с обратной стороны Луны должна начаться с запуска модуля *ROLSSES* (*Radiowave Observations at the Lunar Surface of the photoElectron Sheath*, Радионаблюдения слоя фотоэлектронов на поверхности Луны) в октябре этого года. *ROLSSES* отправится на Луну в составе посадочного модуля частной компании, лицензированной NASA в рамках программы агентства Службы коммерческой доставки грузов на Луну (*Commercial Lunar Payload Services*). Хотя приземлится он в районе Океана Бурь на видимой стороне Луны, задача модуля *ROLSSES* по определению параметров радиочастотных помех, генерируемых лунным грунтом, крайне важна для будущей работы по идентификации других радиосигналов на ее обратной стороне. «Это уже реальность, — говорит Бернс, член

группы разработчиков модуля *ROLSSES*. — Я занимаюсь этим 35 лет. Это действительно большое событие!»

Еще одну экспедицию по изучению радиочастотных помех на Луне — *LuSEE* (*Lunar Surface Electromagnetics Experiment*, Эксперимент по изучению электромагнетизма на поверхности Луны) — планируется отправить уже в 2024 г. «*LuSEE* летит на обратную сторону, — рассказывает Бернс. — Она отправится в метеоритный кратер Шредингер». Посадочный модуль с *LuSEE*, возможно, будет нести и другую полезную нагрузку: *DAPPER* (*Dark Ages Polarimeter Pathfinder*, Поляриметрический зонд темных веков), радиотелескоп для обнаружения сигналов с длиной волны 21 см темных веков Вселенной. «Первоначально *DAPPER* проектировался для работы на орбите вокруг Луны, но, возможно, он переместится на этот посадочный модуль, — говорит Бернс. — NASA финансирует нашу работу над концепцией использования модуля *DAPPER* в этой экспедиции. Мы будем готовы начать».

Независимо от того, будет *DAPPER* находится на орбите или на поверхности Луны, его возможности будут ограничены тем, что комплект его дипольных антенн будет располагаться в одном месте. Однако у астрономов есть и более далеко идущие планы по развертыванию антенных решеток на Луне. Эти решетки, которые объединяют сигналы от отдельных антенн, разнесенных на большие расстояния, действуют как телескопы с разрешением намного большим, чем это было бы возможно с одной антенной, и смогут более точно определять координаты источника на небе.

Эра антенных решеток

Сюэлэй Чэнь (Xuelei Chen) из Национальных астрономических обсерваторий Китайской академии наук считает, что лунная орбита — лучшее место для строительства в ближайшем будущем лунных антенных решеток для картографирования темных веков. Антенны нескольких спутников можно объединить в единую решетку для проведения наблюдений, когда все они будут располагаться на обратной стороне Луны. «Это небольшой эксперимент, требующий умеренных затрат, и мы вполне могли бы провести его с помощью современной техники», — говорит Чэнь.

Согласно ориентировочному плану, для формирования решетки будет летать флот из пяти-восьми спутников, выстроенных в тщательно отрежиссированном порядке.

Один из этих спутников будет представлять собой более крупный базовый модуль, на котором будет находиться большая часть электроники для приема и обработки сигналов от других спутников и дальнейшей передачи готовых результатов на Землю. «Мы хотим запустить их одной ракетой-носителем, чтобы затем выпускать один за другим», — говорит Чэнь.

Размещение такой антенной решетки на поверхности обратной стороны Луны будет намного более сложной задачей по многим причинам, в том числе из-за сильной изрезанности рельефа ее поверхности и опасного для аппарата ледяного холода в течение 14-дневной лунной ночи. Чтобы начать подготовку к такого рода экспедиции, группа Фоинга планирует протестировать развертывание радиоантенн с помощью роботов-вездеходов, разработанных Германским центром авиации и космонавтики. Испытания состоятся в июне на склонах Этны, действующего вулкана на Сицилии, который послужит приближенным аналогом поверхности Луны. Ученые будут управлять луноходами удаленно. Каждый луноход будет нести по четыре комплекта антенн. «Мы разместим их в различных конфигурациях, чтобы показать, что в будущем мы сможем сделать это и на Луне», — поясняет Фоинг.

Другой способ развернуть решетку радиоантенн на обратной стороне Луны — просто сбросить антенны с орбитального аппарата, чтобы они прилунились и раскрылись там, где это возможно. Адами и его коллеги работают над одной из таких идей: низкочастотный интерферометр, предназначенный для точного измерения характеристик радиоизлучения, который включает 128 похожих на фракталы мини-станций. У каждой станции восемь спиц, и на каждой закреплены 16 спиральных антенн. «Моя идея — сбросить их со спутника, чтобы все они опустились на поверхность Луны в разных местах», — говорит Адами.

Чтобы свести к минимуму количество движущихся частей, группа инженеров придумала, как напечатать эти антенны в виде плоских листов, которые примут свою окончательную форму после того, как развернутся на лунной поверхности. «Антенны можно печатать так же быстро, как газеты. Мы тестировали эту технику в течение последних четырех-пяти лет, — говорит Адами. — Мы в процессе изготовления прототипа этих спиральных антенн». В качестве следующего шага, добавляет он,

ученые должны спроектировать мини-станцию и сбросить ее с дрона в отдаленном районе, таком как засушливая область Западной Австралии, чтобы проверить, развернется ли она.

Между тем Бернс также возглавляет финансируемую NASA концептуальную разработку проекта по созданию еще одного лунного радиотелескопа, метко названного *FARSIDE* (*Farside Array for Radio Science Investigations of the Dark ages and Exoplanets*, Антенная решетка на обратной стороне [Луны] для радиоастрономических исследований темных веков и экзопланет). Чтобы разработать *FARSIDE*, Бернс и второй научный руководитель, Грегг Халлинан (Gregg Hallinan) из Калифорнийского технологического института, объединились с Лабораторией реактивного движения NASA. Ученые планируют доставить на поверхность Луны полезный груз из четырех луноходов и 256 антенн общим весом около 1,5 т при

Размещение антенной решетки на поверхности обратной стороны Луны будет намного более сложной задачей в том числе из-за сильной изрезанности рельефа ее поверхности и опасного для аппарата ледяного холода в течение 14-дневной лунной ночи

помощи лунных посадочных модулей, создание которых финансирует NASA. Луноходы развернут антенны, расположив их в виде четырех похожих на цветок лепестков, на участке поверхности диаметром 10 км. «Это мы можем сделать с помощью существующей техники, — говорит Бернс. — Так что все это выглядит вполне достижимым уже в текущем десятилетии». ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

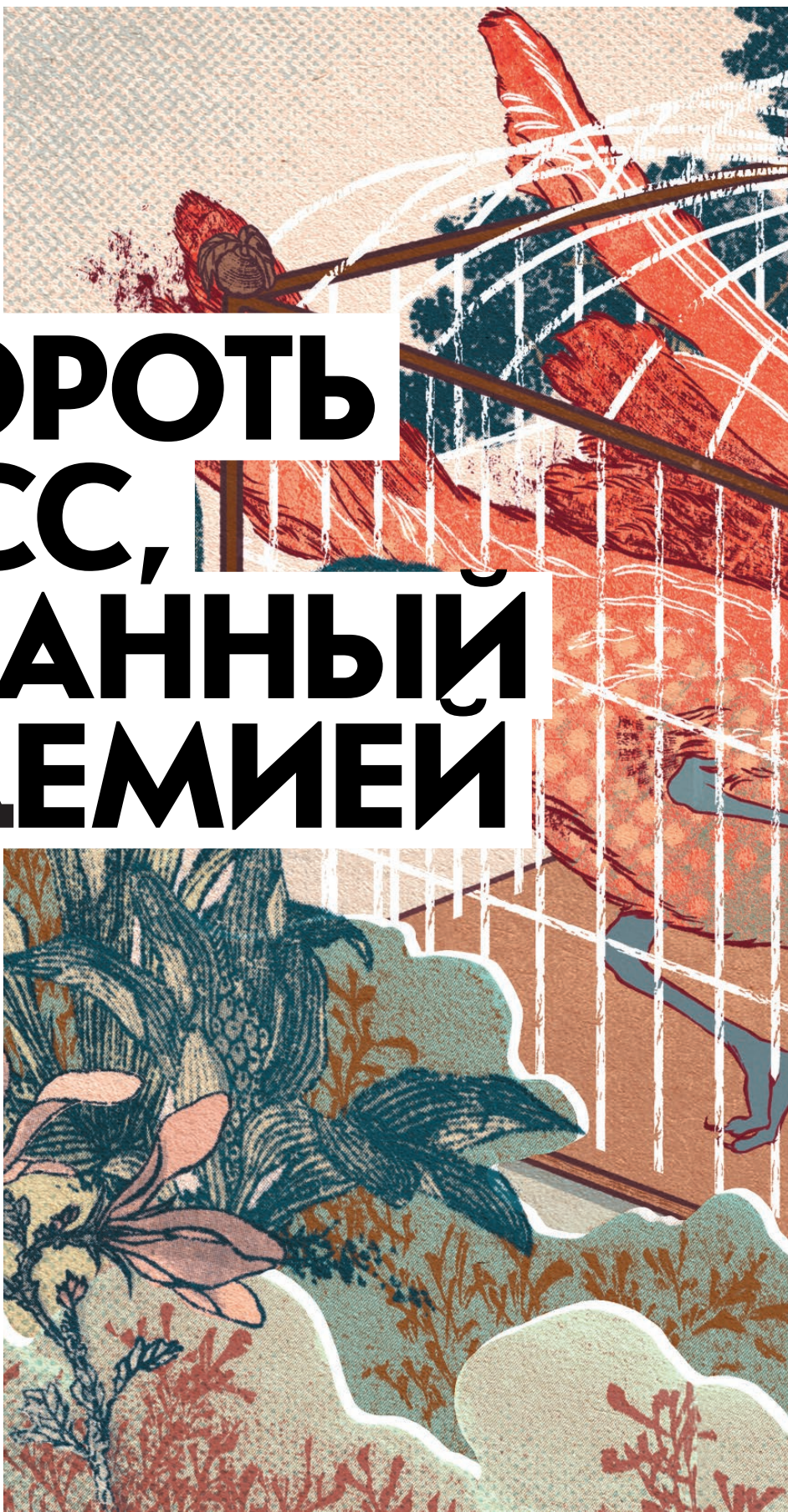
■ Лоеб А. Темные века Вселенной // ВМН, № 3, 2007.

ПСИХОЛОГИЯ

ПОБОРОТЬ СТРЕСС, ВЫЗВАННЫЙ ПАНДЕМИЕЙ

Кризис, вызванный *COVID-19*, длится уже больше года, и это тяжело сказывается на психическом здоровье. Могут оказаться полезными способы борьбы со стрессом, используемые для терапии при катастрофах и травмах

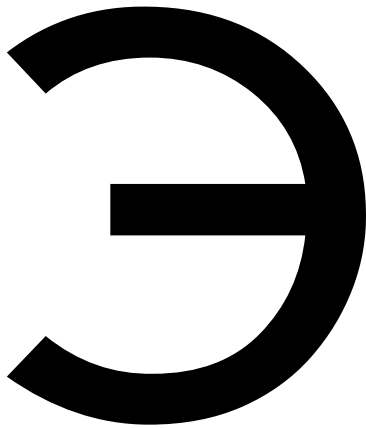
Мелинда Уэннер Мойер





ОБ АВТОРЕ

Мелинда Уэннер Мойер (Melinda Wenner Moyer) — автор статей в *Scientific American*. Ее книга «Как воспитывать детей, чтобы они не становились подлецами: научно обоснованные стратегии наилучшего воспитания от младенчества до подросткового возраста» (*How to Raise Kids Who Aren't Assholes: Science-Based Strategies for Better Parenting — from Tots to Teens*) выйдет в 2021 г.



ми Нитца (Amy Nitza) уже несколько десятилетий помогает людям в кризисных ситуациях. Будучи директором Института психологической помощи пострадавшим при катастрофах Университета штата Нью-Йорк в Нью-Полце, она работала в Пуэрто-Рико после урагана «Мария», в Ботсване в связи с ВИЧ-кризисом, а также на Гаити, помогая справиться с психологической травмой детям, которые были домашними рабами.

По словам Нитцы, пандемия *COVID-19* отличается от всех этих ситуаций. Она длится месяц за месяцем, у людей болеют или погибают близкие, они теряют работу, а меры, принятые для того, чтобы избежать заражения, например изоляция от семьи, вызывают сильную эмоциональную боль и стресс. Миллионы людей по всему миру умерли от коронавируса, и число смертей продолжает расти. Горе, страх и экономические трудности ударили по всем странам. В США самое большое количество жертв в мире — к началу 2021 г. там погибло 400 тыс. человек, миллионы людей серьезно больны. Нитца говорит, что обычно в катастрофах бывают потерпевшие и спасители, но *COVID-19* распространился так широко, что люди одновременно играют обе роли. «Мы учим всех, как позаботиться о себе и поддержать окружающих», — рассказывает Нитца.

Эта зима была особенно мрачной и тяжелой. С самого начала число ежедневных смертей превысило потери от теракта 11 сентября. Иногда вспышки стихают, но затем вновь усиливаются, как волны во время шторма. Большинство американцев смогут получить вакцину лишь спустя несколько месяцев. Многие больницы переполнены из-за потока новых пациентов с *COVID-19*. Никто не знает, когда закончится пандемия и окажется ли будущее хоть немного похожим на то, что было раньше. «Наша страна никогда не переживала ничего подобного», — говорит Чарлз Фигли (Charles

Figley), директор Института травматологии Тулейнского университета в Нью-Орлеане, 40 лет проработавший в психологии катастроф.

Сегодня стресс наносит тяжелейший урон психическому здоровью в США. В июне 2020 г. исследователи из Центров по контролю и профилактике заболеваний опросили 5412 взрослых американцев и обнаружили, что у 25,5% имелись симптомы тревожности и у 24,3% симптомы депрессии, то есть соответственно в три и в четыре раза больше, чем в 2019 г. По словам Сьюзан Боржа (Susan Borja), руководительницы Программы исследования показателей травматического стресса в Национальном институте психического здоровья, это «ошеломляющие цифры». В исследовании, которое пока не прошло рецензирование, ученые из Городского университета Нью-Йорка и Университета Северной Каролины в Чапел-Хилле в апреле 2020 г. опросили 5250 взрослых американцев и обнаружили, что у 35% из них имелись умеренные или выраженные симптомы тревожности. У тех, кто недавно потерял заработок, дела были совсем плохи.

По словам врача Камары Филлис Джонс (Samara Phyllis Jones), изучающей неравенство в здравоохранении, наиболее острую боль пандемия и ее последствия причинили цветной части населения, более уязвимой и менее защищенной. В ноябре 2020 г. уровень безработицы среди чернокожих и латиноамериканцев был соответственно

на 75% и 42% выше, чем среди белого населения. В отличие от белых семей многие чернокожие и латиноамериканские семьи сталкиваются с нехваткой продуктов питания, а цветные дети чаще вынуждены учиться дистанционно из дома, а не очно в школе. Сложности наслаиваются на страдания, непосредственно причиняемые болезнью: в исследовании, опубликованном в июле 2020 г., ученые из Нью-Йоркского университета выяснили, что в тех городских округах США, где население преимущественно цветное, уровень смертности от COVID-19 был почти в десять раз выше, чем в округах с преимущественно белым населением с тем же средним доходом. Среди индейцев, также представляющих собой менее защищенную группу, уровень смертности в первой половине 2020 г. был примерно в два раза выше, чем среди белых.

Теперь, с появлением вакцин, перед нами забрезжило будущее, когда пандемия закончится. Но прежде нам предстоит прожить месяцы, полные травм и напряжения. Как с этим справиться? Как вытерпеть бесконечную изоляцию, смерти, вспышки заболеваемости, экономический крах, страх и неопределенность?

Идеального решения нет, но существуют методы, которые могут быть полезны. Психологи, специализирующиеся на восстановлении после пережитых травм и катастроф, и те, кто работает с пациентами с хроническими заболеваниями и инвалидами, говорят, что большинство из нас переживут эту катастрофу. Они предлагают стратегии преодоления, основанные на опыте и научном знании. Если в тяжелой ситуации люди могут заметить признаки надвигающегося психического расстройства, признать и выразить свое горе, сосредоточиться на текущем моменте и тех мелочах, которые они могут контролировать, и найти способы взаимодействовать с другими людьми, они могут пройти через самые мрачные периоды и выстоять.

«Большинство людей, переживших в жизни крупную катастрофу, в итоге либо вернутся к исходному состоянию, либо в некоторых случаях выйдут из нее в лучшем состоянии, чем были прежде», — говорит Меган Хози (Megan Hosey), реабилитационный психолог из Школы медицины Университета Джонса Хопкинса, работающая с хронически больными пациентами в отделениях интенсивной терапии. Она считает, что большинство из нас «смогут адаптироваться и восстановиться». Для этого, однако, нам нужно быть гибкими, открытыми и честными с самими собой и научиться жить одним днем.

Следить за симптомами

В разгар кризиса бывает трудно отличить естественный уровень тревоги от признаков приближения серьезных психологических проблем. К числу главных симптомов ухудшения психического здоровья относятся изменения в аппетите или режиме сна, длящиеся более недели. Если вы обнаружили, что стали более раздражительны, например чаще срываетесь на близких, это тоже может быть признаком депрессии или тревожности. Ослабление концентрации внимания или неспособность наслаждаться тем, что обычно доставляет вам удовольствие, также может указывать на ухудшение психического здоровья и необходимость подобрать новые стратегии для преодоления трудностей.

Следите за тем, насколько интенсивно вы прибегаете к помощи лекарств, психоактивных веществ и алкоголя. «Мы наблюдаем всплеск их употребления во время пандемии», — говорит Хози. Это не значит, что опасно выпить пива или бокал

«Вы можете чувствовать страх, ужас, злость и обиду и в то же время быть победителем и сохранять стойкость. Чрезвычайно важно напоминать людям, что и то и другое бывает одновременно»

*Мана Али, психолог,
Национальная реабилитационная
больница MedStar*

вина, когда вы испытываете стресс. Но, по ее словам, «если лекарство или психоактивное вещество становится одним из ваших основных способов справиться и вы обнаруживаете, что вам его нужно все больше и больше, это тревожный признак».

Стоит также обратить внимание на физические симптомы, такие как боль, головокружения или нарушение пищеварения. Когда люди эмоционально переживают трудности, их страдания часто проявляются и физически (конечно, при появлении серьезных физических симптомов необходимо посетить врача, чтобы исключить другие причины). Психолог Трейси Праут (Tracy Prout), ее коллеги по Иешива-университету и исследователи из Хайфского университета в Израиле и Пизанского университета в Италии спросили 2787 взрослых людей по всему миру про их психическое здоровье во время пандемии. Оказалось, что у людей, испытывавших наибольший стресс, были сильнее выражены и физические симптомы. Исследование было опубликовано в ноябре 2020 г. в журнале *Frontiers in Psychology*.

Страх — это нормально

Такие симптомы возникают из-за одиночества, непредсказуемости, страха и лишений, вызванных пандемией. Эти переживания хорошо знакомы пациентам, которые лежат в больницах с продолжительными заболеваниями или травмами. Мана Али (Mana Ali), психолог-реабилитолог из Национальной реабилитационной больницы *MedStar* в Вашингтоне, лечит людей с травмами спинного мозга и параличом. Она говорит, что первое, чему она их учит, — признать свои эмоции и не испытывать стыда. «Я всегда говорю моим пациентам, что тревога — это совершенно нормально, просто ею надо управлять, — рассказывает она. — Мы склонны считать, что страх и беспокойство — это плохо и что сила — это когда их нет, но на самом деле все не так». Али поясняет: «Вы можете чувствовать страх, ужас, злость и обиду и в то же время быть победителем и сохранять стойкость. Чрезвычайно важно напоминать людям, что и то и другое бывает одновременно, это не взаимоисключающие понятия».

Для пожилых и одиноких людей общение может быть затруднено, особенно если они недостаточно разбираются в технике. Можно подписаться на услугу еженедельных телефонных разговоров пожилых людей с волонтерами

Реабилитационные психологи и специалисты по психологии катастроф провели исследование, в котором показали, что писать о негативных ощущениях крайне полезно. «Когда об этом пишут, происходит что-то чрезвычайно важное», — говорит Нитца. В начале 1980-х гг. психолог Джеймс Пеннебейкер (James Pennebaker), работавший тогда в Виргинском университете, вместе с коллегами провел исследование, в ходе которого студентов колледжа попросили писать о своих стрессовых переживаниях и чувствах по 15 минут в день четыре раза в неделю. Ребята, которые занимались «экспрессивным письмом», как это назвал Пеннебейкер, в последующие шесть месяцев в два раза реже обращались в студенческий медицинский центр по сравнению с теми, кто этого не делал. В более поздних исследованиях данные выводы были подтверждены, выяснилось, что писать о чувствах дает мощную возможность их проработать.

Хози объясняет, что признание негативных эмоций позволяет поставить вопрос: «Что я могу сделать дальше?» Честно говоря, на него трудно ответить, когда в мире бушует пандемия. Нитца

предлагает попытаться определить, что именно сильнее всего беспокоит вас в данный момент, а затем выявить те элементы ситуации, которые вы можете проконтролировать или улучшить. Если вы только что потеряли работу и беспокоитесь об оплате счетов, подумайте, какие небольшие шаги вы можете предпринять, чтобы вернуть себе ощущение контроля. Может быть, на этой неделе вам надо спланировать новый семейный бюджет или выяснить, на какие программы финансовой помощи вы можете претендовать.

Реабилитационный психолог Дипа Раманатан-Элион (Deera Ramanathan-Elion) из Национального военного научно-инновационного центра *Intrepid* в Форт-Белворе, штат Виргиния, работает с военнослужащими, получившими черепно-мозговые травмы, она объясняет, что «нужна готовность изучать и пробовать». «Если вы сохраните ригидное мышление, вам будет трудно приспособиться к меняющейся среде, неважно, будь это *COVID-19* или что-то еще, — рассказывает она. —

Вам действительно нужно уметь подстраиваться и быть лабильным». Это означает, что вы можете рассмотреть варианты работы, о которых раньше и не думали, или попросить помощи и поддержки у людей, к которым вы обычно за этим не обращались.

Идея в том, чтобы думать о проблемах как о препятствиях, которые вы можете преодолеть (хотя бы частично), а не как о непреодолимых трудностях, с которыми ничего нельзя сделать. Али

говорит, что в пандемии есть аспекты, которые мы не можем контролировать, но мы способны добиться большего, если сосредоточимся на том, что можем хоть немного скорректировать, и будем думать о себе как об устойчивых и адаптирующихся. Неоднократно было продемонстрировано, что когнитивно-поведенческая терапия, которая помогает людям идентифицировать, понять и изменить их представления и поведенческие реакции в этом направлении, способствует укреплению психического здоровья. В исследовании 2020 г. было показано, что когнитивно-поведенческая терапия, организованная через интернет, улучшает состояние людей, страдающих от тревоги или депрессии.

Найдите новые способы общения

Поиск общения с другими людьми тоже помогает. Исследователи из корпорации *RAND* на основе опросов, проведенных после теракта 11 сентября, выяснили, что для взрослых людей самым распространенным способом справиться со своим горем было общение с друзьями и семьей.



Сейчас проблема в том, что для сохранения безопасности во время пандемии такие связи нарушаются. Часто приходится поддерживать физическую дистанцию между близкими людьми, то есть люди вынуждены отказаться от того, что им эмоционально нужнее всего. В 2015 г. ученые из Университета Бригама Янга проанализировали 70 исследований и обнаружили, что люди, сообщавшие о чувстве одиночества, в среднем на 26% чаще умирают в последующие семь лет по сравнению с теми, кто не был одинок. «Постоянно растет число публикаций с непротиворечивыми, воспроизводимыми в разных странах и ситуациях выводами о пагубных последствиях социальной изоляции и одиночества, а также о смягчающем или положительном влиянии социальной поддержки на благополучие», — говорит Кортни Уэлтон-Митчелл

(Courtney Welton-Mitchell), психолог из Колорадской школы здравоохранения и Центра стихийных бедствий Колорадского университета в Боулдере.

Для пожилых и одиноких взаимодействие с другими людьми может быть затруднено, особенно если они недостаточно разбираются в технике, чтобы использовать для общения компьютер или смартфон. Уэлтон-Митчелл рекомендует периодически связываться с родственниками и друзьями по телефону, электронной или обычной почте и, возможно, устраивать регулярные встречи с поддержанием социальной дистанции. Можно еще подписаться на услугу «Звонки заботы» (*Caring Calls*), сервис, созданный некоммерческой организацией *DOROT*, которая один-два раза в неделю устраивает телефонные разговоры пожилых людей с волонтерами. Те, кому удобно пользоваться интернетом, могут подписаться на такие сервисы, как *Big&Mini* или *Eldera*, они организуют видеозвонки между пожилыми и молодыми людьми.

Эмоциональное здоровье можно улучшить также, если заниматься чем-нибудь важным, пусть даже и из дома. По словам нейропсихолога Уильяма Гармо (William Garmoe), работающего вместе с Маной Али в Национальной реабилитационной больнице *MedStar*, это помогает «почувствовать, что вы причастны к чему-то более значимому».

В статье, опубликованной в 2007 г., группа из 20 специалистов по психологии катастроф из разных стран проанализировала исследования наиболее важных психологических потребностей людей во время катастрофы. Они сообщили, что главные потребности — это ощущение безопасности, спокойствия, своей эффективности, надежды и социальных связей. Когда люди занимаются деятельностью, приносящей пользу другим, они удовлетворяют три потребности — чувствуют себя полезными, ощущают связь с другими людьми и надежду на будущее. Если вы не знаете, с чего начать, посмотрите, что можно сделать для вашего района очно или онлайн на сайтах *VolunteerMatch.org* или *Idealist.org*.

Виртуальная психотерапия — еще один способ социального взаимодействия. После начала пандемии федеральное законодательство и законы штатов ослабили некоторые ограничения на использование телемедицины, поэтому сейчас стало проще получить психологическую помощь через интернет. Поиск психотерапевта может быть затруднен, если у вас нет медицинской страховки или денег для оплаты его услуг, но существуют возможности получить помощь бесплатно или недорого: например, сайт *Opencounseling.com* позволяет искать бесплатных или недорогих терапевтов, а не только тех, кто работает по страховке или за полную плату.

Одно из ключевых преимуществ терапии — тесные отношения между пациентом и психотерапевтом, которые способствуют сильному ощущению сопричастности. «Вы встречаетесь с кем-то, с кем у вас есть настоящие отношения, — с тем, кто о вас заботится, стремится вас понять, тепло к вам относится и принимает вас, — объясняет Брюс Уамполд (Bruce Wampold), заслуженный профессор психологического консультирования Висконсинского университета в Мадисоне. — И на многих людей это действует исцеляюще».

Психотерапия помогает и за счет того, что подталкивает к конструктивным способам преодоления страха и тревоги. В исследовании, опубликованном в ноябре 2020 г., Праут с коллегами спрашивали взрослых людей, какие стратегии помогли им лучше чувствовать себя во время пандемии. Оказалось, что общавшиеся с другими людьми и помогавшие им ощущали меньше беспокойства по сравнению с теми, кто переживал менее здоровым способом, подавляя свои чувства или проявляя враждебность.

Обратите внимание на себя

Одна из наибольших сложностей, связанных с коронавирусом, заключается в том, что он создает слишком много неопределенности в будущем. «Мы любим возможность планировать и ставить цели, — рассказывает Раманатан-Элион. — Нам нравится двигаться по жизни строго организованным образом». Но большинство из нас не знают, когда мы получим доступ к вакцине от *COVID-19*, сможем ли мы заплатить арендную плату в следующем месяце и когда закончится социальная изоляция. Мы не знаем, заболеем ли мы *COVID-19*, и если да, то чем это закончится.

Психологи отмечают, что людям, имеющим серьезные травмы или хронические заболевания, тоже приходится справляться с неопределенностью и обычно это лучше всего получается, если сосредоточиться на настоящем, обращая внимание на свои чувства и ощущения в данный момент, а не на то, что не может быть известно с достаточной точностью. Цель состоит в том, чтобы «просто

жить сегодня. Потому что мы не знаем, как будет выглядеть завтрашний день», — говорит Хози.

Один из приемов, действительно помогающий людям обрести почву под ногами в текущем дне, — это «осознанность», и достичь ее можно разными способами, в том числе с помощью непродолжительных медитаций. В опубликованном в 2018 г. обзоре проанализировали 18 исследований и показали, что регулярные упражнения на осознанность, такие как концентрация на дыхании и «сканирование тела», когда вы обращаете внимание на то, как ощущаются части вашего тела, и пытаетесь их расслабить, ослабляют симптомы тревожности и депрессии даже при отсутствии какого-либо другого лечения.

Если мысль о медитации вызывает у вас неловкость, можно достичь состояния осознанности и без этого. Один из способов — сосредоточиться на ощущениях, которые вы испытываете во время выполнения таких повседневных действий, как еда или чистка зубов. Нитца говорит, что недавно купила несколько книжек-раскрасок для взрослых, поскольку обнаружила, что раскрашивание помогает ей «сфокусировать внимание на том, что происходит сейчас».

Независимо от того, каким образом мы добиваемся состояния осознанности, это позволяет нам успокоиться, потому что «наше дыхание замедляется, мозг получает сообщение, что с нами все в порядке и рядом нет повода для тревоги, нет никакого стрессового фактора, на который нам надо обратить внимание», — рассказывает Раманатан-Элион.

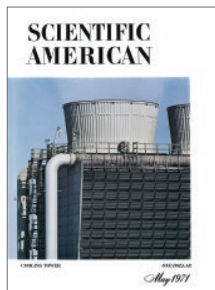
Не существует единого для всех способа поддержания психического здоровья, какой подход лучше всего подойдет именно вам — зависит от вашей ситуации, доступа к ресурсам и личных предпочтений. Психологи рекомендуют доверять своим ощущениям и использовать те стратегии, которые доступны и, как вам кажется, могут быть наиболее эффективными. Будьте готовы пробовать новое, если окажется, что первоначально выбранный подход не работает.

Помните, что чем дольше длится пандемия, тем лучше мы к ней приспосабливаемся, потому что люди удивительно хорошо адаптируются к новым ситуациям. Было тяжело, и, несомненно, может стать еще тяжелее. Но люди «сильнее, чем думают», — говорит Фигли. — Я часто замечаю, что люди невероятно устойчивы». ■

Перевод: М.С. Багоцкая

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Дэнурт Л. Крупнейший психологический эксперимент // ВМН, № 8–9, 2020.



МАЙ 1971

Когда началось время. «Специально разработанное оборудование было установлено в двух удаленных друг от друга местах: в моей лаборатории в Мэрилендском университете и в Аргоннской национальной лаборатории недалеко от Чикаго. В течение последних двух

лет одновременное увеличение выходного сигнала с детекторов на этих объектах служило доказательством всплеск гравитационного излучения, исходящего из центра Галактики. Эти открытия стимулировали появление множества теоретических построений и породили разногласия среди астрофизиков. Можно предположить, что возможный источник — необычный объект, например пульсирующая нейтронная звезда. Возможно также, что масса в центре Галактики действует как гигантская линза, фокусирующая гравитационное излучение из более ранней эпохи Вселенной. Большая интенсивность, возможно, говорит нам о том, когда началось время». — Джозеф Вебер (Joseph Weber).

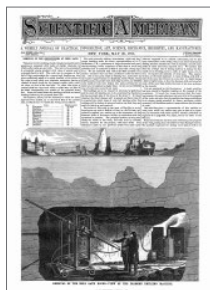


МАЙ 1921

Новости науки. Граждане должны иметь возможность пользоваться плодами науки, поэтому важно, чтобы люди понимали современную науку. При финансовой поддержке г-на Эдварда Уиллиса Скриппса (Edward Willis Scripps) был заложен фундамент «Службы

науки» (*Science Service*). Ее задача — публиковать книги и журналы, проводить лекции и конференции, создавать кинофильмы, а самое главное — она позволит расширить возможности средней газеты освещать научные новости.

Радио дома. Мы на пороге новой эры в радиосвязи. Идея состоит в том, чтобы в центральных пунктах были станции, передающие по радио концертную музыку, а также речи и лекции, а в домах и клубах — компактные приемные устройства, улавливающие эти волны. Уже работают несколько радиостанций; одна компания, занимающаяся беспроводной связью, разработала приемное устройство, выполненное в виде шкафа, скрывающего громкоговорящий телефонный блок, так что передачу можно слышать повсюду в комнате. Полагают, что ведущие производители радиооборудования будут поддерживать службы, передающие радиофонические концерты и лекции для своих постоянных клиентов.

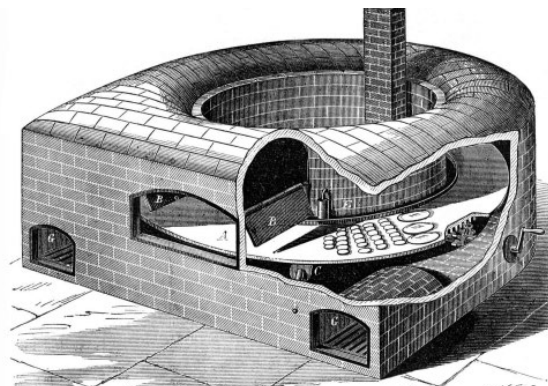


МАЙ 1871

Хлеб высшего качества. В недавно изобретенной пекарской печи попытались объединить достоинства старинной кирпичной печи с преимуществами механических печей непрерывного действия. Последние оказались непригодны для выпекания вкусного и полезного хлеба.

В новую печь загружают тесто и после того, как оно проходит полный круг на вращающейся платформе, извлекают готовый хлеб. Распашные заслонки предотвращают потери тепла. Заявлено, что в этой печи можно печь все что угодно. Утверждают также, что она экономно расходует топливо и требует меньших затрат рабочей силы.

В соляной шахте. «Самые производительные в мире соляные шахты находятся в Величке, в австрийской Польше, в 16 км от Кракова. Максимальная глубина — около 250 м. В шахтах семь уровней. Нас спускали вниз в железной корзине, где мы сидели, свесив ноги наружу и держась за веревки, прикрепленные сверху к кольцу, опоясывающему железный шток. Когда мы спустились, один из сопровождающих с факелом шел впереди меня, а другой позади, пока мы шли по деревянному мосту, спустились на один пролет вниз по лестнице и далее через несколько проходов, вырубленных в пластах соли. Соль сильно различается по качеству. Зеленая соль содержит 6–7% глины, что нарушает ее прозрачность. Другой сорт (*spiza*) — кристаллическая, но смешанная с песком; абсолютно чистую (*szybik*) находят в крупных кристаллизованных массах. Объем добычи рудника составляет около 500 тыс. бочек в год. Одна бочка вмещает 1,1 тыс. л и стоит \$10. Когда рудники были открыты, точно никому не известно, но можно с уверенностью сказать, что они эксплуатировались почти девять веков». — Джуниус Генри Браун (Junius Henri Browne).



Новая печь выпекает хлеб с современной экономичностью и со старым добрым вкусом, 1871 г.



И

НАУКА И ОБЩЕСТВО

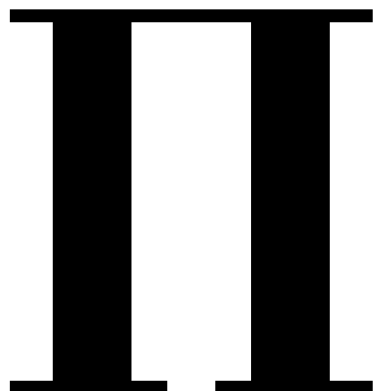
COVID-19: ЗАЩИТА ОТ ДЕЗ- ИНФОРМАЦИИ

У каждого из нас больше сил, чем кажется

Кэтрин Холл Джеймисон

ОБ АВТОРЕ

Кэтлин Холл Джеймисон (Kathleen Hall Jamieson) — директор Школы коммуникаций Пенсильванского университета, соучредительница *FactCheck.org*.



очти вся моя научная карьера связана с поисками путей противостояния дезинформации и помощью в понимании сложности политики и науки. Когда мы с коллегами решили посмотреть, как связаны между собой восприимчивость к дезинформации и неприятие правил поведения, которые могли бы остановить распространение инфекции, ответ пришел сам собой: те, кто верит во всяческие конспирологические теории относительно происхождения *COVID-19* и опасности вакцин, не склонны носить маски, соблюдать социальную дистанцию, как можно чаще мыть руки и делать прививку.

В разгар любой пандемии крайне важно опираться на науку. Это неоспоримо. Но что мы под этим понимаем? Первое, что приходит на ум, — выполнение требований органов здравоохранения относительно соблюдения «правил трех W» [*Wear a mask* (ношение масок), *Watch your distance* (социальное дистанцирование), *Wash your hands* (мытьё рук)] либо обращение к FAQ-сайтам Центров по контролю и профилактике заболеваний (CDC). Спросите любого, кого он считает экспертом в области медицины, и вы услышите, что это семейный доктор или такие специалисты, как Энтони Фаучи (Anthony S. Fauci), директор Национального института аллергии и инфекционных заболеваний США, либо Санджай Гупта (Sanjay Gupta) из CNN; эти двое появляются на экране телевизора так часто, что вы воспринимаете их как членов семьи. Но Фаучи нет в списке ваших Zoom-контактов и он не будет присутствовать при заявлении вашего родственника: «По данным CDC, маски скорее повышают вероятность заражения *COVID-19*». Точно так же и Гупта не поможет, если подруга вашей дочери уверовала в чипирование населения планеты с помощью вакцины против *COVID-19*.

На самом деле важнее всего то, как мы сами реагируем на подобную информацию. В статье Джеймса Оуэна Уэзеролла (James Owen Weatherall) и Кайлин О'Коннор (Cailin O'Connor), опубликованной в нашем журнале в 2019 г., утверждается, что «распространение знаний в обществе — сердце культуры и науки». Подтверждение этому можно найти, обратившись к масштабному сетевому онлайн-эксперименту, проведенному в 2018 г. Дугом Гильбо (Doug Guilbeault) и Деймоном Чентолой (Damon Centola), которые работали в то время в Школе коммуникаций Анненберга Пенсильванского университета. Когда заядлые курильщики и некурящие

совместно оценивали сообщения о рисках табакокурения, первые чаще признавали вред этого пристрастия, чем такие же, как они, но оценивающие сообщения самостоятельно. Такую ситуацию наблюдали Салли Чан (Sally Chan) и Долорес Альбаррасин (Dolores Albarracín) из Иллинойсского университета в Эрбана — Шампейне: число высказываний в Twitter о «мошенничестве с вакцинами» в период с ноября 2018 г. по февраль 2019 г. (таковых было примерно 3 тыс.) коррелировало с относительным числом негативно высказывающихся о вакцинах против *COVID-19* и уменьшением числа получавших прививку от гриппа к концу 2019 г. Совсем другая картина наблюдалась среди людей, обсуждавших ситуацию с вакцинами с родственниками и друзьями.

Действительно, с последними вы найдете общий язык быстрее, чем с представителями органов здравоохранения или такими экспертами, как Фаучи. Дело не только в том, что мы относимся с большим доверием к знакомым и близким нам людям, но и в том, что такие люди скорее найдут подходящий момент для того, чтобы объяснить, почему защитное поведение очень важно и почему они сами доверяют эпидемиологам, утверждающим, что такое поведение препятствует распространению вируса. Родственники и друзья знают вас лучше, чем кто-либо другой, и будут вести беседу с учетом ваших особенностей и предпочтений. И, наконец (что крайне важно учитывать), дезинформацию вы получаете в другом месте и в другое время, чем слышите аргументы, ее разоблачающие.

Располагая даже не очень обширным набором защитных инструментов, вы можете стать частью масштабной системы по борьбе с дезинформацией — системы защиты науки, как я ее называю. Чтобы оценить ее возможности, остановимся на ограничениях первой линии

защиты от онлайн-обмана: готовности блокировать платформы. Даже если с этим все в порядке, проходит какое-то время между появлением ложного контента, его обнаружением и удалением. Возьмем для примера 26-минутный ролик *Plandemic*, появившийся в сети в мае прошлого года. Несмотря на все усилия по его удалению, за несколько недель ролик просмотрели миллионы людей; а между тем в нем содержались ложные, наносящие вред здоровью утверждения (например, такое: некоторые вакцины против гриппа содержат коронавируса, и ношение маски активирует его). Аналогично тому, как это происходит в игре *Whac-A-Mole*, когда одна платформа блокирует часть контента, дезинформаторы перебрасывают информацию на другую платформу или делают ее доступной только для приглашенных. В марте прошлого года, даже несмотря на удаление из *Facebook* фейков разного рода о COVID-19, один из отчетов *Politico* информировал о тысячах сообщений, в которых утверждалось, что запрещенный контент все еще жив и делает свое черное дело.

Такие организации по проверке фактов, как *PolitiFact* и *FactCheck.org* (одним из их учредителей я стала в 2003 г.), создали второй барьер в системе защиты от дезинформации. Ссылки на многие из них можно найти в *Facebook*, занимаясь поисками контента, помеченного как содержащий дезинформацию. В исследовании 2015 г. Летиции Боде (*Leticia Bode*) и Эмили Враги (*Emily K. Vraga*), которые в то время работали в Висконсинском университете в Мадисоне, отмечается, что такого рода корректирующие сопоставления помогают пользователям правильно воспринимать информацию. Позже, в 2018 г., Боде и Враги обнаружили, что коррекция, предлагаемая в одной из соцсетей, тоже уменьшает вероятность ошибочной интерпретации. В результате упомянутые исследовательницы сочли своим долгом настоятельно рекомендовать всем пишущим «основываться на надежных источниках информации и излагать свое отношение к фейковым сообщениям, касающимся медицины, коротко, ясно и доказательно». Пионером в этой области онлайн-коммуникации стала группа врачей из *CriticaScience*. При поддержке Фонда Роберта Вуда Джонсона мы с коллегами из *FactCheck.org* работали над тем, чтобы вооружить население земного шара новыми инструментами защиты от дезинформации в сфере борьбы с COVID-19.

Когда дезинформация обходит блокировку, систему проверки фактов и ответы онлайн-собеседников (а это бывает слишком часто), последней линией обороны остается общение с членами семьи, друзьями, коллегами. Участие в системе защиты науки подразумевает приверженность здоровому образу жизни, обращение к сайтам органов здравоохранения и сайтам проверки фактов о COVID-19 и вакцинации, понимание сущности научных утверждений и области их применения, наличие некоего набора достижимых целей и соблюдение принципа деполитизации науки, если этого требует ситуация.

Каждый уровень в системе защиты науки — блокировка платформы, проверка фактов, онлайн-общение, создание сообщества, опирающегося на науку, — имеет свои ограничения. Но любой дополнительный уровень защиты замедляет распространение дезинформации, которая облетит полимира, прежде чем обман раскроется. Что касается ситуации с COVID-19, то здесь есть по крайней мере две области, где ценность истинного знания особенно высока: одна из них касается вопроса ношения масок, вторая — вакцинации.



1 Поиск и сохранение важных фактов

Если найти нужную информацию самостоятельно не удастся, мы полагаемся на мнение экспертов. Предположим, что вы не сомневаетесь в адекватности перечня ингредиентов вакцины *Pfizer/BioNTech* против COVID-19 (этот перечень есть на сайте Управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (*FDA*) США). В таком случае вам не придет в голову мысль о том, что вместе с вакциной вам введут некое устройство слежения.

Но вот вопрос: насколько велико доверие взрослого населения к тем организациям, которые выдают сертификаты на медицинскую продукцию? Результаты опроса, проведенного совместно *New York Times* и Сиенским колледжем в июне прошлого года в США, неоднозначны: среди демократов медицинским экспертам доверяют 90%, но среди республиканцев — всего 75%. Это значит, что каждый четвертый сторонник Республиканской партии не станет прислушиваться к советам Фаучи и *FDA*. Однако даже в такие времена, как наши, когда общество настолько поляризовано, большинство американцев (84%) говорят, что доверяют ученым-медикам, а 77% относятся так же к рекомендациям *CDC*.

Приступая к формированию защитного набора, добавьте в закладки страничку *CDC* с ответами на самые часто задаваемые вопросы о COVID-19, а также информацию из таких наиболее надежных источников, как *Associated Press*, *Reuters*, *USA Today*, *Washington Post*, *PolitiFact* и *FactCheck.org*. Для оценки целесообразности подобных действий используйте следующий сценарий: предположим, ваш хороший знакомый говорит, что, согласно результатам исследований *CDC*, маски неэффективны, и задается вопросом, прав ли Дональд Трамп, заявивший на одном из публичных мероприятий, что «85% людей, которые носят маски, заражаются вирусом». Первое, что вы обнаруживаете в результате поиска, — все ведущие специалисты по проверке фактов независимо друг от друга приходят к одному и тому же

выводу. Ответ *Associated Press*: «Данные утверждения искажают результаты исследований CDC относительно целесообразности ношения масок». *USA Today*: «Из отчета CDC не следует, что те, кто носит маски, заражаются вирусом чаще». Резюме *Reuters*: «Искажены результаты исследования о подверженности населения атаке со стороны нового коронавируса». Если вы хотите узнать, верны ли эти утверждения, обратитесь к исходным исследованиям CDC, ссылки на которые есть в каждой статье *Reuters* и *FactCheck.org*.

Все сходится на том, что и переболевшие COVID-19, и те, кому удалось избежать заражения, расценивают целесообразность ношения масок примерно одинаково. При этом следует учитывать, что первые с большей вероятностью, чем вторые, посещали кафе и рестораны или, скажем, не так строго придерживались социального дистанцирования. Наш метаанализ исследований, нацеленных на выявление дезинформации, показал, что разного рода детали могут играть существенную роль; отсюда следует, что корректирующие уточнения повышают доверие к утверждениям того или иного рода. Другими словами, в нашем случае уточнения указывают на то, что носившие маски и все-таки заразившиеся скорее всего вели себя ненадлежащим образом, повышая риск заражения. Ведь сев за столик в ресторане, вы непременно снимете маску, прежде чем приступить к трапезе.



2 Помните: наука не стоит на месте

Наука находится в постоянном поиске знаний, и выводы из них меняются. Однако некоторые ученые, не говоря уж о журналистах, иногда вводят нас в заблуждение, заявляя, что полученный результат не подлежит сомнению. Анализ, проведенный нами в рамках гранта Фонда Риты Аллен, показал, что новостной аккаунт представляет работу ученого, приводящую к некоему открытию, как последовательный процесс преодоления

трудностей, и завершается этот «линейный» процесс «открытием» — получением нового «достоверного» знания. Гуманитарии воспринимают эту структуру как классическое повествование об увлекательном путешествии с одной-единственной концовкой. Но концовка может быть не единственной, а бывает и так, что ее вообще нет.

В новостных аккаунтах, посвященных научным открытиям, широко распространен сюжет квеста. Наш анализ 600 с лишним статей о науке, опубликованных в период с 2013 г. по 2018 г., показал, что, как правило, в них не упоминается о фальстартах, пробах и ошибках, роли интуиции — обо всем, что характерно для научного процесса. В большинстве из них не говорится, что некоторые вопросы остаются без ответа. Но, как отмечает научный обозреватель *New York Times* Карл Циммер (Carl Zimmer), «никакая научная статья не дает истину в последней инстанции. В лучшем случае она констатирует *status quo*».

Принимая во внимание то, что наука имеет итеративный характер, то есть ее выводы могут быть неокончательными, авторы статьи в *Washington Post* говорят по поводу ношения масок следующее: «Имейте в виду, что по ходу исследования коронавируса — возбудителя нынешней эпидемии — рекомендации относительно целесообразности ношения масок могут измениться, соответственно изменятся и FAQ». Проигнорировав этот факт, бывший президент США Трамп неправильно интерпретировал или не понял слова Фаучи, произнесенные им в начале марта прошлого года. «Ведь Фаучи сказал: "Не носите маски", не так ли? Вот я и не ношу», — заявил Трамп Саванне Гатри (Savannah Guthrie) из *NBC* в октябре прошлого года. Позже он изменил свое поведение.

Выборочно отредактированный видеоклип, в котором Фаучи говорит, что «не нужно все время ходить в маске», просмотрели миллионы пользователей в *Facebook*, *YouTube* и *Twitter*. Атака на это вырванное из контекста заявление не учитывала того факта, что наука не стоит на месте и ее выводы должны подвергаться коррекции с учетом новых данных. В период между началом марта и 3 апреля, когда было обнародовано требование CDC надевать маски при контакте с людьми, не входящими в круг проживающих вместе с вами, вирусологи выяснили, что есть носители, не проявляющие никаких симптомов, но способные заражать других людей. При дефиците средств защиты в самом начале эпидемии это незнание нанесло огромный урон медицинскому персоналу. Пока производство масок не было увеличено, врачам и другим работникам приходилось носить хирургические респираторы № 95, которых тоже не хватало. Об этом же говорил и Фаучи.

В передаче *60 Minutes*, вышедшей 8 марта 2020 г., он разъяснял доктору Джону Лапуку (Jon LaPook): «Маски необходимо носить тем, кто уже инфицирован и может заразить других <...>. В данный момент жителям США не нужно носить их постоянно. Они необходимы медицинским работникам и больным <...>. Я вовсе не против масок. Если вам хочется — надевайте их». — «Но это может привести к дефициту!» — возразил Лапук. — «Верно, в этом все и дело, — ответил Фаучи. — Масок может не хватить тем, кто на самом деле в них нуждается».

Итак, когда кто-нибудь говорит вам, что директору Национального института аллергии и инфекционных заболеваний нельзя верить, поскольку как-то раз он



«Антимасочники» вводят людей в заблуждение, приводя вырванные из контекста цитаты из выступления Энтони Фаучи

заявил, что «не нужно носить маску постоянно», вспомните, что эти рекомендации относились к неинфицированным людям и что в то время не было достоверно известно о бессимптомных случаях болезни и о том, что вирус передается воздушно-капельным путем.

Другая причина, по которой стоит сделать закладку с сайтом Центров по контролю и профилактике заболеваний, заключается в том, что вы получите актуальную и достоверную информацию. «Маска — это не более чем барьер, который помогает удерживать микрокапельки слюны, когда вы чихаете. Это уменьшает вероятность попадания их на тех, кто находится рядом с вами». Обратите внимание на слова «помогает» и «уменьшает». Когда эпидемиологи говорят, что «маски работают», это означает, что они «помогают предотвратить» инфицирование и «уменьшают» распространение вируса. С учетом этого вы не делаете ошибку, полагая, что если человек, носящий маску, все-таки заразился, это значит, что маски бесполезны.

Предостережения особенно важны, когда дело касается вакцинации. Вместо того чтобы категорически утверждать, что вакцина Pfizer безопасна, CDC информирует вас, что «полученные данные [по поводу одобренной FDA вакцины Pfizer-BioNTech] свидетельствуют о том, что уже известные и только предполагаемые преимущества этой вакцины перевешивают известные и потенциальные риски заражения COVID-19». Один из возможных рисков: у очень небольшого числа из множества вакцинированных возникла аллергическая реакция, отнесенная экспертами CDC к категории серьезных, то есть такая, которая потребовала лечения

с помощью эпинефрина или EpiPen или даже госпитализации. Одно из основных преимуществ: последовательное введение двух доз Pfizer или Moderna существенно уменьшает вероятность того, что имя вакцинированно-го попадет в список из полумиллиона американцев, чью жизнь унес COVID-19.



3 Следуйте нормам правильного поведения

Задолго до того, как пандемия COVID-19 ворвалась в нашу жизнь, работники системы здравоохранения, семейные врачи и родители постоянно напоминали нам, что во время вспышки гриппа нужно особенно часто мыть руки с мылом, чтобы не подхватить вирус. Так же настойчиво они советовали держаться подальше от тех, кто кашляет или чихает. Поскольку социальные нормы во многом формируют наше поведение и поскольку мы знаем из повседневной жизни, что эти нормы уменьшают передачу вируса гриппа и тем самым сезонную заболеваемость, мы стараемся их придерживаться. В результате, как показали наши наблюдения, еще до появления в средствах массовой информации соответствующих рекомендаций и предостережений при первых упоминаниях о появлении нового высококонтагиозного вируса девять из каждых десяти американцев (87%) стали тщательнее мыть руки и держаться на расстоянии от людей с симптомами респираторных инфекций.

Отсюда вывод: придерживаясь уже апробированного поведения, в частности ношения масок, его особенно страстные ревнители способствуют превращению такого поведения в норму. Стоит напомнить, что подавляющее большинство населения США на самом деле верит в то, что маски полезны. Опрос, проведенный Фондом семьи Кайзера в декабре, показал, что трое из четверых взрослых жителей США надевают их при каждом выходе из дома.

4 Деполитизируйте науку

В соответствии с теорией психологической реактивности запреты вызывают скорее отторжение, чем принятие. Имеющий большой опыт защитник науки выслушает доводы противника вакцинации и ношения масок и изложит свои контраргументы.

«За противостоянием между сторонниками и противниками ношения масок часто стоят политические разногласия», — говорится в одном ток-шоу, организованном Национальным государственным радио. Отказ от масок воспринимается иногда как приверженность партии консерваторов, поэтому страстный защитник науки будет оперировать такими примерами, в которых сторонники сходного идеологического уклона отстаивали свою позицию, как это делал бывший сенатор от штата Кентукки Митч Макконнелл (Mitch McConnell) в 2020 г. или бывший губернатор штата Нью-Джерси Крис Кристи (Chris Christie), который позже заявил в статье, опубликованной в *Wall Street Journal*: «Переболев COVID-19, я пришел к выводу, что мне следовало носить маску». Истории с Кристи или — если обратиться к вакцинам — с врачом Юджинией Саут (Eugenia South) («Я чернокожий доктор, не доверявший вакцине от COVID-19. Вот что изменило мое мнение о ней») весьма убедительны. Мы с коллегами увидели это в действительности, проанализировав реакцию людей на объяснение экоактивиста Марка Линаса (Mark Lynas) по поводу генетически модифицированных зерновых: раньше он был их категорическим противником, а теперь отдает им предпочтение. Те, кто ознакомился с его аккаунтом, быстрее переменили свое отношение к генетически модифицированным продуктам, чем люди, которым были представлены только его аргументы в пользу преимуществ.



5 Подумайте, прежде чем лайкать

Когда мы, находясь в социальной сети, нажимаем на кнопку *Like*, мы подтверждаем, что контент нам нравится и мы ему доверяем. Делясь этой информацией с другими пользователями, мы усиливаем степень доверия. Значок с поднятым большим пальцем — это не только сигнал о том, что сообщество приняло контент; тем самым мы приглашаем других присоединиться к нашей группе. Такой процесс обмена сигналами может служить как инструментом распространения научных знаний, так и способом жульничества относительно вируса (*viral deception, VD*).

Как и в случае с исходным *VD*, связанным с венерическим заболеванием, нынешний *VD* заразен и распространяется среди членов сообщества. Поэтому, в соответствии с рекомендациями *Scientific American*, опубликованными в 2019 г., прежде чем нажать кнопку *Like*, нажмите кнопку «Пауза». Если сообщение относится к категории *VD*, отправьте его в «карантин». Если же данные исходят из надежного источника и согласуются с тем, о чем говорится на веб-сайтах *CDC* или Национальных институтов здравоохранения, поделитесь ими, нажав кнопку *Send, Like* или *Share*.

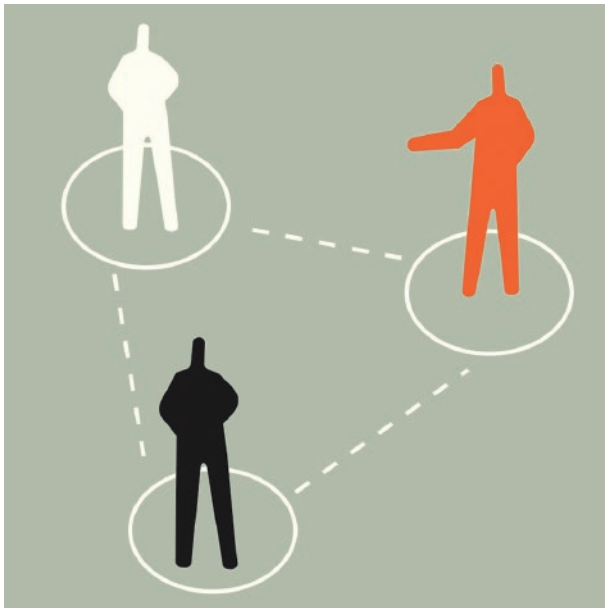
6 Позаботьтесь о безопасности окружающих

Люди, отстаивающие научный подход, могут реализовать свои идеи здесь и сейчас — защищая от угрозы инфекции своих соседей, детей, преподавателей, родственников, обитателей домов престарелых, друзей, работающих в местной больнице или городской аптеке. Принять превентивные меры могут даже сомневающиеся.

В качестве примера приведем Гэри Абернати (Gary Abernathy) из штата Огайо, который в 2020 г. опубликовал в *Washington Post* статью под заголовком «Я сомневаюсь в пользе маски. Но вот почему сейчас я ее надел». Автор поясняет, что в данном случае он заботится о душевном спокойствии окружающих, которые придерживаются другого мнения, и поясняет: «Я знаком с заявлением Центров по контролю и профилактике заболеваний о том, что страхи по поводу нового инфекционного заболевания <...> бывает трудно преодолеть и они вызывают сильные эмоции как у детей, так и у взрослых». И далее автор поясняет, что солидарен с доводами *CDC*, состоящими в том, что «директивный уклон в таких рекомендациях, как соблюдение социальной дистанции, может вызвать у людей ощущение, что они находятся в изоляции от всего мира, и только усилить стресс». Такое сочетание

Неверную информацию вы обычно получаете в одном месте, а ее разоблачение слышите в другом; те, кто верит фейкам, редко заботятся о проверке фактов

информированности, понимания и сочувствия привело его к принятию норм, выработанных сообществом, несмотря на остающиеся сомнения. «Вот почему, — поясняет Абернати, — независимо от того, нужно это или нет, я надеваю маску, когда захожу в магазин, где много людей». Решение носить маску, принятое автором статьи прошлым летом, и объяснение, почему он это сделал, дают основание считать его членом сообщества защиты науки. И, как показало исследование, которое провели в 2001 г. Долорес Альбаррасин и Роберт Уайер (Robert Weyer), соблюдение предписаний о необходимости защитного поведения, даже если вы не уверены в его целесообразности, может способствовать перемене ваших взглядов.



7 Ставьте реалистичные цели

Один из выводов, к которому мы с коллегой Джо Капеллой (Joe Cappella) пришли в нашем десятилетнем исследовании ток-шоу на радио, заключается в том, что гости принимали аргументы тех ведущих, которые уже были им хорошо знакомы по ежедневным эфирам. Вовлекая гостей в дискуссию, ведущий вечернего ток-шоу Раш Лимбо (Rush Limbaugh) не только просвещал их, но и частично переубеждал. Это означает, что популярный ведущий, чья аудитория не выработала четкого мнения относительно защитного поведения или иммунизации, может привлечь на свою сторону по крайней мере часть людей с помощью подходов, используемых в системе защиты науки, — точно так же, как это может сделать член семьи, действительно близкий человек.

Но есть люди, которых не переубедят никакие аргументы. И вместо того чтобы попусту тратить на них время, лучше сосредоточиться на менее упертых и частично придерживающихся защитного поведения.

Коллеблющиеся могут оказаться более восприимчивыми к новой информации, чем когда-то полагали исследователи. В работе, опубликованной в прошлом году

Опираясь на проверенные источники информации и придерживаясь научного подхода, мы вносим личный вклад в систему защиты своего локального сообщества

в журнале *Nature*, опровергается предположение, что неопределившиеся с вакцинацией безнадежны. Напротив, они обращаются в поисках информации к интернету, чтобы в конце концов прийти к четкому решению. Проблема в том, что в интернете они вероятнее всего найдут больше доводов против, чем за.

8 Формируйте групповой иммунитет

Выстраивая систему защиты — нечто вроде концентрических окружностей вокруг домов, где мы живем, вокруг мест общения с соседями и другими людьми, вокруг торговых центров, детских садов и школ, больницы и профильных клиник, — мы работаем на формирование группового иммунитета. Речь идет об иммунитете не на уровне нации или штата, а на уровне локальных сообществ, в частности семей.

Когда врачи говорят о некоем иммунном пороге — относительном числе членов популяции (в процентах), необходимом для прекращения распространения инфекции, — они имеют в виду коллективный иммунитет. Если большой процент населения какого-либо штата сделал прививку от кори, но в некоей субпопуляции этого штата таких людей мало, это означает, что они уязвимы. Именно так было в сообществе выходцев из Сомали в Миннесоте. В 2017 г., когда произошла вспышка кори, в этом сообществе были вакцинированы всего 36% детей, что имело печальные последствия. Вместо того чтобы думать о коллективном иммунитете, имеет смысл работать над формированием иммунитета сообществ — идет ли речь о кори, COVID-19 или гриппе.

Опираясь на проверенные источники информации, придерживаясь научного подхода, выработывая поведение, которое помогало бы сдерживать распространение инфекции и фейков о ней, реально оценивая наши возможности и их пределы, а также препятствуя политизации науки, мы вносим личный вклад в систему защиты своего локального сообщества. Это повышает вероятность того, что нашему примеру последуют как другие члены нашего сообщества, так и другие сообщества. ■

Перевод: Н.Н Шафрановская

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Ашванден К. Истинное число смертей от COVID-19 // ВМН. № 3, 2021.

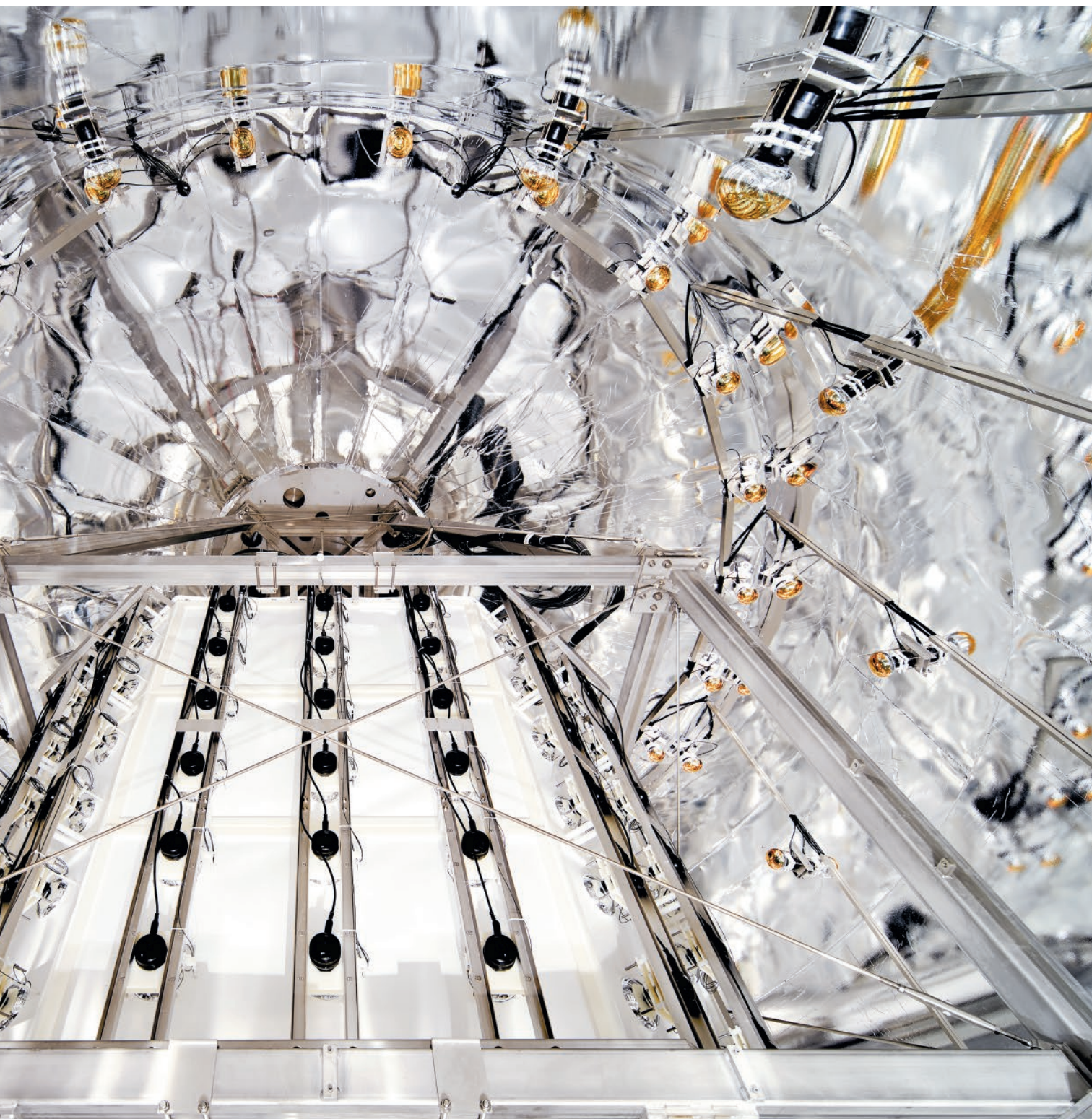
ПОСЛЕДНЯЯ БИТВА ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

В новом эксперименте могут быть пойманы невидимые частицы, которые ускользали от предыдущих детекторов

Клара Московиц

УЧЕНЫЕ ЛЮБЯТ ГОВОРИТЬ, что отрицательные результаты так же важны, как и положительные, но после нескольких десятилетий безуспешных поисков исследователи могут быть прощены за проявление нетерпения. Еще в 1990-х гг. начались эксперименты по обнаружению частиц, которые должны составлять темную материю — вездесущее, но неуловимое невидимое вещество, по-видимому, заполняющее космос. С тех пор физики (*прежде всего астрономы и космологи.* — *Примеч. пер.*) обнаруживают все больше и больше доказательств того, что темная материя действительно существует, однако не находят ни единого признака частиц этой материи. Новая версия продолжительного эксперимента XENON, который начался в конце прошлого года, нацелена на то, чтобы окончательно нарушить создавшуюся патовую ситуацию.





Охрана от нейтронов

Среди усовершенствований эксперимента XENON, которые будут введены во время его нового запуска, присутствует система улавливания свободных нейтронов. Последние могут создавать сигналы, подобные тем, которые вызваны темной материей. Нейтроны иногда выделяются нержавеющей сталью в резервуаре для воды, которая окружает детектор, а также лучами, приходящими из космоса. Обе эти возможности приводят к ложному обнаружению. Внутри резервуара для воды находится восьмиугольный каркас охраны от нейтронов (или вето нейтронов). Он покрыт выходами фотоумножительных трубок, которые будут обнаруживать любые присутствующие нейтроны.

ОБ АВТОРЕ

Клара Московиц (Clara Moskowitz) — ведущий редактор журнала *Scientific American* по разделам «Космос» и «Физика».



На протяжении долгого времени одна из лучших догадок физиков относительно идентификации темной материи — это так называемые вимпы (*WIMP*, от англ. *Weakly Interacting Massive Particles*, «слабо взаимодействующие массивные частицы»). Эти гипотетические элементарные частицы могут обладать массами в очень широком диапазоне: между массой протона и массой, в 1 тыс. раз превышающей массу протона. Вимпы должны взаимодействовать с обычными атомами только гравитационно, а также посредством слабого ядерного взаимодействия, которое управляет радиоактивным распадом. Однако с годами, по мере того как в одном эксперименте за другим ничего не удавалось найти, энтузиазм начал угасать. «Приходит время пораскинуть мозгами и прийти к выводу, что, возможно, это не та лошадь, на которую стоило поставить», — говорит Рафаэль Лэнг (Rafael Lang), физик из Университета Пердью, который работает над экспериментом *XENON* в Национальной лаборатории Гран-Сассо в Италии уже более десяти лет. Однако сейчас Лэнг говорит, что все еще делает ставку на вимпы. Ученый указывает на то обстоятельство, что эксперименты опровергли многие теории, предсказывающие, как могут выглядеть эти частицы, но, конечно, не все. «Если вы верили в вимпы десять лет

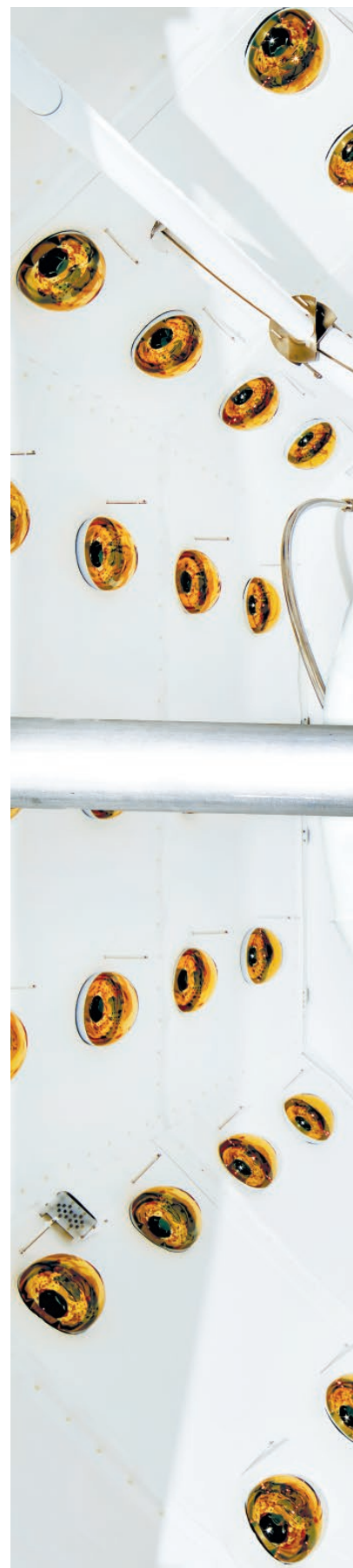
назад, то с тех пор только половину *WIMP*-частиц исключили, — говорит он. — Другая половина еще жива».

Конечно, существует много других кандидатов на роль темной материи. Основной конкурент вимпов — аксион, гораздо более легкая гипотетическая частица, которая в последнее время породила целое направление возможных поисков так называемых аксиноподобных частиц. Некоторые ученые воодушевлены идеей о том, что темная материя может оказаться составной частицей — конгломератом «темных кварков» и «темных глюонов», которые слипаются вместе, как обычные кварки и глюоны, формируя «темные ядра». Возможно также, что темная материя вообще не состоит из частиц. Так, до сих пор не отброшена гипотеза о том, что недостающая материя состоит из первичных черных дыр, которые образовались вскоре после Большого взрыва.

Новейшая версия эксперимента *XENON* — *XENONnT* — начала сбор данных в прошлом году. Цель эксперимента — поймать темные частицы в очень, очень редких случаях, когда они могут столкнуться с обычными атомами. В данном случае с атомами ксенона, 8,3 т которого хранятся в жидком виде в гигантском чане, погребенном под более 1,5 км скальной породы для защиты от космических лучей и других возможных шумов. Ксенон с его 54 протонами,

Луковые слои

Структура эксперимента *XENONnT* напоминает луковичу из нескольких слоев для защиты от посторонних частиц, которые могут имитировать темную материю. Первый такой слой — гора, в недрах которой расположена подземная лаборатория Гран-Сассо. Слои породы останавливают большинство космических лучей, которые могут приносить шум в результаты. Следующий слой представляет собой резервуар для воды размером примерно 10 x 10 м, который окружает внутреннее содержимое, блокируя большую часть частиц, высвобождающихся из-за радиоактивности стен и камней вокруг лаборатории. В этом резервуаре располагается система охраны (или система-вето) от нейтронов, которая также будет заполнена водой, показанной на рисунке изнутри. Внутри находится белый цилиндрический внешний криостат — по сути, термос, — который содержит внутренний криостат. Наконец, внутренний криостат окружает сам детектор, который заполнен жидким ксеноном.





электронами и еще большим количеством нейтронов — хорошая плотная мишень для темной материи. Если какая-нибудь экзотическая частица ударит в ядро ксенона, то она сможет отправить ядро или электрон в полет через жидкость, что породит вспышку света. Эту вспышку смогли бы зарегистрировать фотоумножители на верхней и нижней частях чана. XENONnT содержит в четыре раза больше ксенона, чем предыдущая версия этого эксперимента. Последнее означает, что вероятность зарегистрировать сигнал в четыре раза выше.

Другие модернизации включают улучшенную очистку ксенона и усовершенствованные системы обнаружения космических лучей и следовых количеств радиоактивных элементов в эксперименте и его корпусе, которые могут маскироваться под сигналы темной материи. По словам Лэнга, «каждые гайка и болт на детекторе изготовлены вручную из тщательно отобранных материалов, потому что болт из нержавеющей стали, купленный в хозяйственном магазине, оказался бы слишком радиоактивным для наших нужд».

Для внешнего мира годы кропотливой работы без награды за открытие могут показаться разочаровывающими, но физики видят это иначе. «Если судить по тому, обнаружена ли темная материя, то нет, не обнаружена, однако в глазах сообщества это исключительно успешный эксперимент», — говорит физик-теоретик Дорота Грабовска (Dorota Grabowska) из CERN, не участвующая в проекте. Успех эксперимента, по ее словам, заключается во множестве возможностей, которые были исключены, и во все возрастающей чувствительности, которой достиг этот эксперимент.

Сейчас настал переломный этап в поиске WIMP-частиц. В относительно недалеком будущем подземные эксперименты с темной материей

смогут исследовать столь обширную часть теоретического ландшафта, какую способны достичь. Если подземные эксперименты не обнаружат вимпы, это может означать, что они либо не существуют, либо принимают какие-то формы, сумевшие ускользнуть от наблюдений. Однако ученые изобретательны — они могут породить новые идеи о том, чем может быть темная материя, и новые способы ее поиска быстрее, чем будет происходить строительство новых детекторов. «Поиск новых способов обнаружения кандидатов в темную материю — это волнительный и во многом творческий процесс», — говорит физик-теоретик Тунъянь Линь (Tongyan Lin) из Калифорнийского университета в Сан-Диего. Одна из идей, над которой она работает, заключается в использовании кристаллов для улавливания темных частиц. В кристаллической форме такие элементы, как кремний, могут регистрировать взаимодействие с темной материей при более низких энергиях, чем традиционные детекторы, таким образом открывая новый канал для обнаружения.

Хотя темная материя оказалась более неуловимой, чем по некоторым первоначальным предположениям, физики далеки от сдачи позиций. «У многих обывателей взгляд на науку основан на телесериале "Звездный путь", — говорит физик-теоретик Тим Тейт (Tim Tait) из Калифорнийского университета в Ирвайне. — Ты что-то видишь, достаешь трикордер (*Tri-function reCORDER* — зондирование, вычисление, запись. — Примеч. пер.) и получаешь ответ. Но на самом деле это очень сложный процесс, и вы пробуете много вещей, пока не найдете что-то, что работает. Все, что не работало, было важной частью процесса».

Перевод: О.С. Сажина

Зеркальное изображение

Трубки фотоумножителя выстраиваются вдоль резервуара для воды, который покрыт отражающей фольгой, создающей двойное изображение. Оптические приборы достаточно чувствительны, чтобы обнаружить один-единственный фотон, выделяющийся при взаимодействии частиц. В этом случае трубка предназначена для того, чтобы улавливать сигналы мюонов, которые могут проникать в эксперимент в виде космических лучей. Несколько отличающиеся друг от друга фотоумножительные трубки выстраивают слой охраны от нейтронов и сам внутренний детектор.







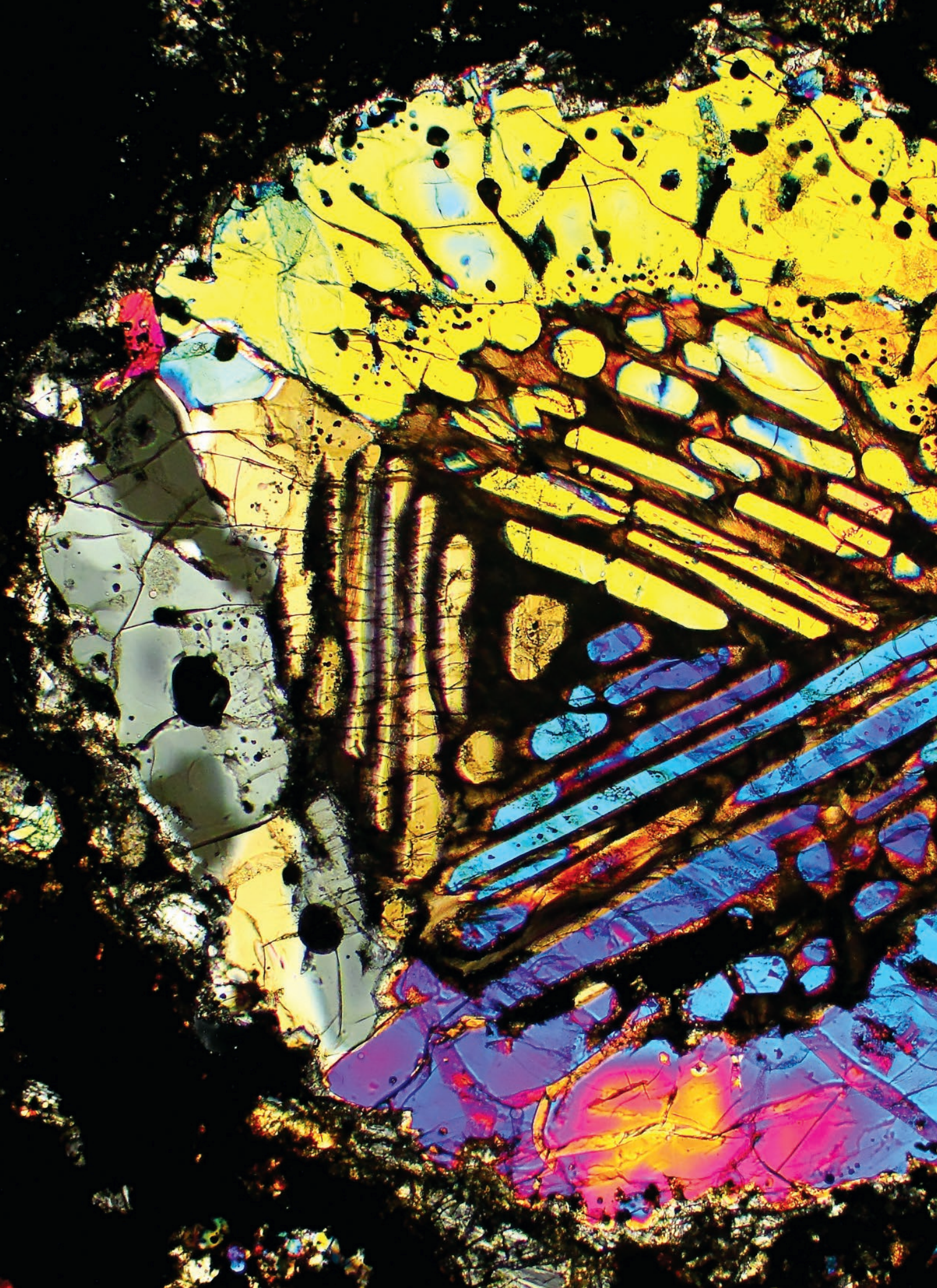


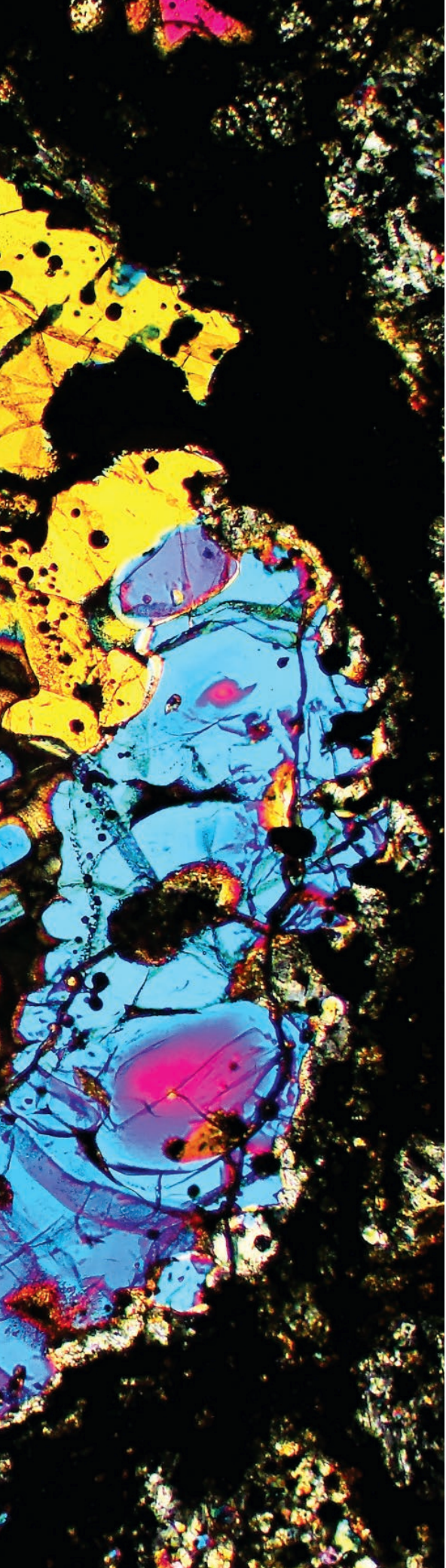
Финальная проверка

Техник осуществляет последнюю проверку незаполненного резервуара для воды. Эксперимент XENONnT будет продолжаться в течение пяти лет, прежде чем достигнет своей проектной чувствительности. В этот момент он либо обнаружит WIMP-частицы, либо исключит более двух третей теоретически возможных WIMP-частиц, которые все еще входят в список кандидатов. Аналогичный эксперимент, названный LUX-ZEPLIN (LZ), проводится в Южной Дакоте. Настройки обоих экспериментов несколько различаются и поэтому обеспечат важную перекрестную проверку результатов друг друга, если в каком-то из них будет обнаружен сигнал новых частиц.

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Гарсиа-Бейидо Х., Клесс С.
Черные дыры в начале
времен // ВМН, № 8–9, 2017.





Удивительная наука ХАЙДНУХО

ПЛАНЕТОЛОГИЯ

Изучение материала астероида Рюгу, возможно, поможет ученым наконец выяснить происхождение загадочных объектов и узнать, что они могут рассказать нам о рождении Солнечной системы

Джонатан
О'Каллаган

ОБ АВТОРЕ

Джонатан О'Каллаган (Jonathan O'Callaghan) — внештатный журналист, освещающий коммерческие космические полеты, исследования космоса и астрофизику.



Ка

псула размером с тостер вошла в нашу атмосферу со скоростью 12 км/с, противостоя во время спуска обжигающей температуре 3 тыс. градусов Цельсия, а затем раскрыла парашют, чтобы замедлить скорость. Она продолжала падать, пока не достигла земной тверди в малонаселенной местности Австралии. В течение нескольких часов группы ученых с помощью радара обнаружили место приземления капсулы и поспешили за ней на вертолете. В капсуле находились кусочки астероида — самый большой улов подобного рода в истории, — захваченные за миллионы километров от Земли и благополучно доставленные на нашу планету.

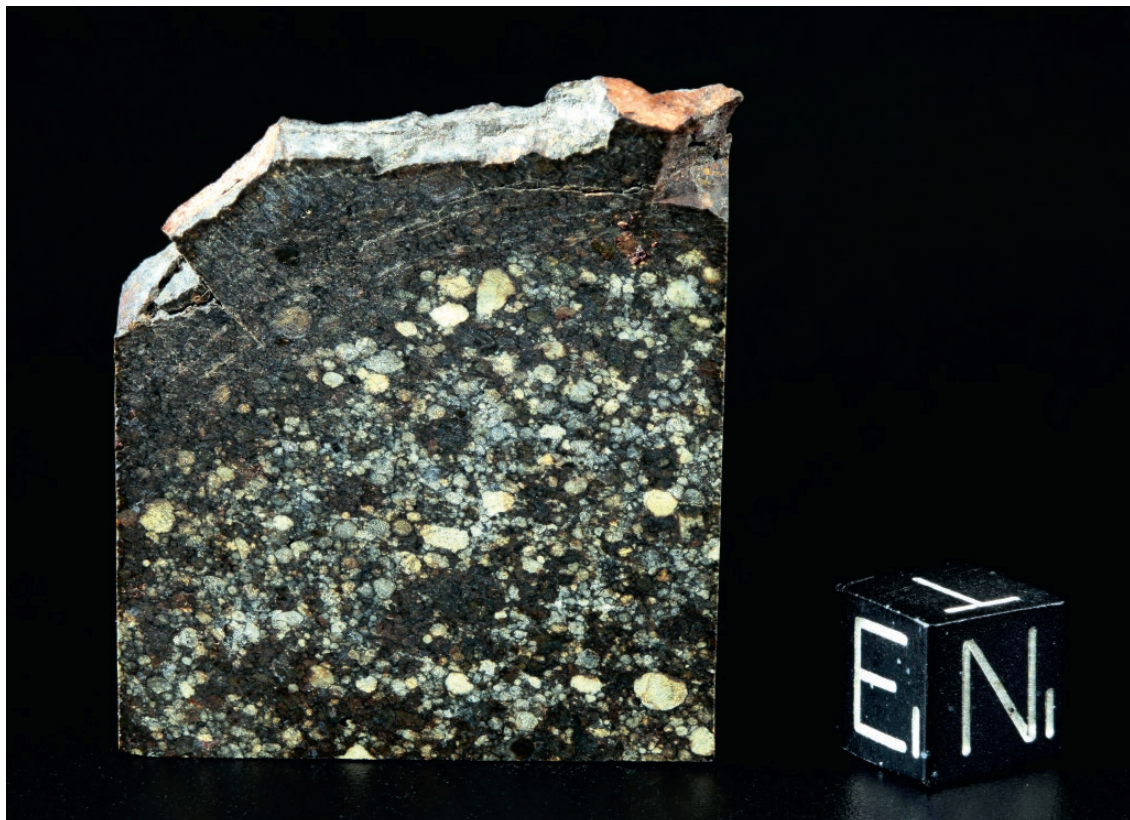
Это событие, кульминация экспедиции «Хаябуса-2» (яп. «Сапсан-2») Японского космического агентства (JAXA) к астероиду Рюгу, произошло в воскресенье, 6 декабря 2020 г. по местному времени. Всего лишь второй раз космический аппарат доставил на Землю кусочки астероида (впервые это было сделано в ходе предыдущей экспедиции — «Хаябуса», стартовавшей в 2003 г.). С помощью этих образцов ученые надеются получить ответ на сложные вопросы, касающиеся истории Солнечной системы и нашей собственной планеты. Сколько лет астероидам, таким как Рюгу? Сколько в их составе воды и органических веществ? И не они ли миллиарды лет назад первыми занесли компоненты, необходимые для возникновения жизни, на Землю?

В то время как большинство групп исследователей астероида Рюгу озадачены этими простыми вопросами, гораздо меньше ученых займутся другим, не менее важным вопросом: содержат или нет образцы «Хаябусы-2» любопытный компонент почти всех известных метеоритов? Пока никому не удалось объяснить происхождение этого компонента, но в случае успеха последствия будут потрясающими. Возможно, это откроет нам не только окутанную туманом историю Солнечной системы, но и ранее скрытые от нас детали процесса,

в результате которого сформировалась свита планет нашего Солнца. Для понимания того, как родилась Земля (и, по сути, любая планета в космосе), возможно, нет ничего более важного, чем тайна хондр.

Хондры — это небольшие похожие на семена растений камешки размером всего несколько миллиметров в диаметре, которые, как считается, образовались около 4,5 млрд лет назад, вскоре после рождения Солнечной системы. Затем они вошли в состав более крупных камней, называемых хондритами, которые составляют большую часть из примерно 60 тыс. метеоритов, обнаруженных людьми на протяжении задокументированной истории.

«Хондры есть повсюду», — утверждает Фред Цисла (Fred Ciesla), планетолог из Чикагского университета. Тем не менее на протяжении уже почти двух столетий ученые так и не смогли прийти к единому мнению о том, как они образовались. Некоторые считают, что они — побочный продукт при формировании планет; другие утверждают, что они были теми самыми семенами, которые привели к образованию самой планеты. В любом случае перечень сценариев образования хондр обширен: от спекания частиц пыли молнией или при столкновении глыб протопланет до мощнейших нагревающих газ ударных волн,



Хондры составляют большую часть вещества в срезе Барратты, 203-килограммового метеорита, обыкновенного хондрита, который упал в Новом Южном Уэльсе (Австралия)

проносящихся через зародышевое облако материала, окружавшее наше только что родившееся Солнце.

Иными словами, возможно, понимание процесса образования хондр поможет нам разглядеть самые ранние моменты жизни Солнечной системы. И теперь, имея на руках только что полученные результаты экспедиций, таких как «Хаябуса-2», а также других направлений исследований, одержимые хондрами ученые на пороге ответа на давний вопрос: откуда они — а, возможно, и мы — взялись? «За этими разноцветными витражами открывается панорама самого раннего периода существования Солнечной системы, — объясняет Гарольд Коннолли (Harold Connolly), космохимик и эксперт по хондрам из Университета Роуэна. — Они свидетели процессов, происходивших в ранней Солнечной системе. Вопрос: свидетелями чего они были?»

Капельки огня

В 1802 г. британский химик Эдвард Говард (Edward Howard) одним из первых ученых выявил хондры в метеоритах, назвав их «округлыми глобулами». Их современное название, данное впоследствии немецким минералогом

Густавом Розе (Gustav Rose) и австрийским минералогом Густавом Чермаком (Gustav Tschermak), происходит от греческого *chondros* («зерно»). В 1877 г. британский ученый Генри Сорби (Henry Sorby) охарактеризовал их более подробно, описав хондры как «капли огненного дождя», расплавленные шарики, которые конденсировались в окрестностях Солнца, хотя тогда, как, впрочем, и сейчас, никто точно не знал, как они образовались.

Общие представления о возникновении нашей Солнечной системы ясны в большей степени. История ее формирования, которую ученые проследили путем десятилетий наблюдений и моделирования, началась более 4,5 млрд лет назад, когда пыль и газ гигантского молекулярного облака коллапсировали под воздействием гравитации, образовав протозвезду, впоследствии ставшую нашим Солнцем. Это протосолнце было окружено вращающимся газово-пылевым диском. Внутри диска суммарное воздействие сил гравитации, аэродинамики и электростатики заставляло частицы пыли слипаться, образуя все более и более крупные агломераты, такие как планетезимали, километрового масштаба строительные блоки планет, и в течение



Космический зонд «Хаябуса-2» в июле 2019 г. забрал образцы потенциально богатого хондрами вещества астероида Рюгу (так это выглядело по мнению художника) для дальнейшей их доставки на Землю

нескольких миллионов лет планетезимали соединились в планеты. Эти планеты постепенно обрели знакомые нам сегодня формы и орбиты. Но если общие представления этой истории в достаточной степени понятны, детали остаются загадкой. Хондры появляются в ее первых главах, где-то во время прыжка от пыли к планетезималиям. Как пройти путь от микроскопических пылинок к планетам размером в тысячи километров в поперечнике?

Хондры — это, по сути, камни внутри камней. В хондритовых метеоритах они выглядят как округлые крупинки. Некоторые видны невооруженным глазом, другие можно разглядеть только под микроскопом. Трудно поверить, насколько часто встречаются хондры: несмотря на тот факт, что ни одной из них, как известно, не удалось пережить процесс включения в состав планет, в космосе они очень широко распространены, часто составляя основную часть материала хондритных

метеоритов. Некоторые хондриты настолько набиты хондрами, что выглядят почти как сгусток из бусинок.

Сами хондры, состоящие из минералов, таких как оливин, пироксен и иногда стекло, бывают самых разных формы, размера и химического состава. Часто они содержат сверкающие вкрапления кристаллов. Ученые могут датировать время их образования окном в несколько миллионов лет, примерно 4,567 млрд лет назад, измеряя содержание в них алюминия-26, короткоживущего радиоактивного изотопа. Согласно этой хронологии, хондры — вторые по возрасту узнаваемые объекты в Солнечной системе после так называемых белых включений, богатых кальцием и алюминием белых пятнышек в метеоритах, которые, как полагают, образовались на 1–3 млн лет ранее в результате конденсации газа, окружавшего молодое Солнце.

Существует множество классов хондритов. Это, например, полные хондр обычные

хондриты, на которые приходится более десяти десятых содержащих хондры метеоритов. Углистые хондриты, составляющие около 4% от общего числа хондритов, как правило, имеют высокое содержание углерода; полагают, что самые богатые углеродом хондриты образовались во внешней части Солнечной системы. У подгруппы хондритов, называемых CI-хондритами (углистые хондриты I группы), имеется только микроскопические хондры, потому что более крупные были вымыты водой, которая когда-то текла через их родительское тело. А отличие хондритов группы CV состоит в том, что это единственный тип хондритов, относительно формирования которых достигнуто почти всеобщее согласие. «Метеориты этой группы, как мы предполагаем, образовались во время одного гигантского столкновения», — объясняет Сара Расселл (Sara Russell), планетолог лондонского Музея естественной истории. Такое происхождение, характер которого в основных чертах установлен, делает их «чем-то волшебным».

А как насчет точного происхождения всех остальных разновидностей хондритов? Об этом остается только догадываться. «Это расстраивает, но в то же время есть некое удовольствие от того, что мы этого не знаем, — объясняет Расселл. — Они, очевидно, рассказывают нам о каком-то универсальном, чрезвычайно важном процессе, в ходе которого сформировалась Солнечная система. Нам просто нужно разобраться в том, что это такое».

Невозможная проблема

В 2000 г. на Конференции по изучению Луны и планет в Хьюстоне ошеломленная аудитория наблюдала, как Джон Вуд (John A. Wood), тогда еще работавший в Гарвардском университете, один из самых уважаемых ученых в области метеоритики, кажется, признал свое поражение в понимании происхождения хондр. Как и многие до него, Вуд увлекся хондрами, как только впервые их увидел. «[Эти] маленькие каменные шарики были настолько обворожительны, интересны и загадочны, что я просто запал на них», — рассказывает он. Но он был раздосадован отсутствием прогресса. «Мы до сих пор не понимаем, о чем говорят нам метеориты, и иногда я задаюсь вопросом, узнаем ли мы это когда-нибудь», — написал он в тезисах своего выступления. Несколько лет спустя, столкнувшись с нехваткой финансирования, он решил уйти на пенсию, переключив свое внимание на масляную живопись и проводя время с женой. «Я завязал с наркотиком науки», — поясняет Вуд.

Его выступление стало для многих шоком. «По сути, он сказал, что зря потратил всю свою жизнь, занимаясь хондрами, потому что эту проблему решить невозможно, — говорит Конел Александер (Conel Alexander), космохимик из Научного института Карнеги в Вашингтоне, округ Колумбия. — Это заявление очень многих расстроило». Ларри Ниттлер (Larry Nittler), также космохимик из этого же института, присутствовавший среди слушателей, говорит, что он «встал грудью» на защиту исследований хондр. «Я сказал, что все еще в восторге от этих невероятных камней, прилетевших из космоса, — вспоминает он. — Мне кажется, что я не получил столько же внимания или похвал за что-либо, сделанное мною за свою карьеру. Весь зал взорвался аплодисментами».

Пессимизм Вуда вполне понятен. В конце концов, космическим ученым удалось окончательно разрешить множество, казалось бы, неразрешимых загадок. Они разложили

Сегодня существует столько же теорий образования хондр, сколько на свете ученых, исследующих хондры, — а завтра, несомненно, концепций станет еще больше

по фрагментам первые моменты существования Вселенной, открыли планеты вокруг других звезд, наблюдали гравитационные волны и получили изображения черной дыры. На фоне таких достижений кажется, что научное значение непреступной загадки скромной хондры становится даже мельче, чем предполагает ее и без того узкоспециализированный статус. Сегодня, как говорится в анекдоте, существует столько же теорий образования хондр, сколько на свете ученых, изучающих хондры, — а завтра этих теорий несомненно станет еще больше.

Проблема хондр много лет передавалась из поколения в поколение, вдохновляя одну когорту ученых за другой на попытки — с переменным успехом — разгадать эту загадку. Основная проблема — найти модель, которая могла бы объяснить все многообразие различных свойств хондр. «Нет моделей, которые все расставили бы на свои места», — объясняет Александер. Для образования хондр в ходе какого-то процесса в ранней Солнечной системе пыль должна была нагреться

до температуры около 2 тыс. градусов Цельсия, а затем быстро остыть в течение нескольких дней или даже часов. Процесс этот, каким бы он ни был, скорее всего, происходил во всей Солнечной системе, и, по-видимому, это единственный способ объяснить большое количество хондр, обнаруженных в хондритах на Земле. Характерные кольца скопившейся пыли, обнаруженные в центрах хондр, дают основания предполагать, что, должно быть, они также какое-то время дрейфовали сквозь пыльные окрестности нашего только что сжавшегося в единое целое Солнца.

Большинство ученых-хондрологов принадлежат к одному из двух лагерей. Первые считают, что хондры были одними из первых твердых объектов, которые появились в Солнечной системе, образовавшись непосредственно из околосолнечной туманности — газовой-пылевой облака, окружавшего наше молодое Солнце. Это позволило бы хондрам стать ключевой ступенькой на пути от крохотной песчинки пыли к более крупным, километрового размера, планетезималиям. Второй лагерь уверен, что хондры не были в числе первых образовавшихся твердых тел, а на самом деле возникли после планетезималей — возможно, даже после самих планет. С этой точки зрения они были побочным продуктом процесса формирования планет, а не активной его частью.

Представители первого лагеря привержены идее, что гравитационная нестабильность в газовой-пылевом диске вокруг нашего Солнца приводила к возникновению «фронтов ударных волн», которые и «сплавляли» часть пыли в хондры. «Если посмотреть на изображение галактики, можно увидеть закручивающиеся по спирали рукава; то же самое, вероятно, происходило и в протопланетном диске, — поясняет Риан Джонс (Rhian Jones), космохимик из Манчестерского университета в Англии. — А благодаря разнице в плотности между массивными рукавами и газом возможно образование фронтов ударных волн».

Между тем более радикальная модель грозвых разрядов в околосолнечной туманности предполагает, что в результате трения между частицами пыли и газа вокруг Солнца полыхали огромные молнии, которые сплавляли эту пыль в хондры, хотя неясно, как такая молния могла возникнуть. Некоторые модели предлагают существование «фабрик» по производству хондр, возникающих в слоях электрического тока, удерживаемых огромными магнитными полями внутри вращающегося протопланетного диска. Такие «кузницы», в которых расплавлялись пылинки, чтобы затем,

соединяясь, образовывать первичные глобулы, имели, вероятно, десятки или сотни тысяч километров в поперечнике.

В другом лагере, члены которого утверждают, что хондры образовались после планетезималей, одна из наиболее известных моделей называется формированием хондр в результате «ударного выброса». Согласно ей, планетезималии сталкивались с высокими скоростями, образуя необходимое для рождения хондр тепло. «Фактически это приводит к выбросу какого-то количества расплавленного материала, который может распадаться на капли, — объясняет Брэндон Джонсон (Brandon Johnson), планетолог из Университета Пердью. Еще один из вариантов формирования хондр, называемый «разбрызгиванием», вероятно, имел место при столкновениях между расплавленными объектами на более низких скоростях, в результате чего в космосе разлетались капли, которые, затвердевая, образовывали хондры.

Между тем модель образования ударных волн в околосолнечной туманности утверждает, что планетные зародыши размером с Марс, движущиеся сквозь туманность, могут действовать как плывущие по воде лодки, спелая пыль в хондры. «Поскольку зародыш движется сквозь газ со сверхзвуковой скоростью, он создает головную ударную волну, — рассказывает Стивен Деш (Steven Desch), астрофизик из Университета штата Аризона. — Попадая в этот сжатый горячий газ, пыль, предшественница хондр, нагревается, и там происходит ее превращение в хондры».

Среди других идей — нагревание излучением, относительно новое дополнение в некоторых моделях, предполагающее, что планетезималии, пролетавшие вблизи расплавленных небесных тел, возможно, нагревались до высокой температуры, а затем охлаждались, образуя хондры. Камни, подвергшиеся такой естественной «термообработке», по-видимому, более прочны и с большей вероятностью выжили при прохождении через атмосферу Земли, что объясняет, почему большинство обнаруживаемых нами метеоритов — хондриты. «Метеориты стали твердыми, а атмосфера Земли — это фильтр, который отсеивает все камни кроме действительно плотных и твердых», — объясняет астроном Уильям Хербст (William Herbst) из Уэслианского университета, один из ученых, выдвинувших эту идею.

На фоне этой набирающей силу волны теорий ряд более диких идей уже не рассматриваются. События, происходящие за пределами Солнечной системы, такие как гамма-всплески (чрезвычайно мощные взрывы, вызванные



Член группы обеспечения космической экспедиции «Хаябуса-2» переносит возвращаемую капсулу зонда после ее приземления и извлечения из спускаемого аппарата недалеко от Вумеры (Австралия) в декабре 2020 г.

слиянием нейтронных звезд или черных дыр), когда-то предлагались в качестве возможной причины, но теперь это представляется неправдоподобным из-за огромных расстояний. Тем не менее остается все еще множество моделей — ситуация, осложняемая тем фактом, что теория образования планет вообще не предсказывает хондры. «Мы можем описать историю формирования планет без включения в нее какого-либо процесса, ведущего к образованию хондр, — говорит Цисла. — Очевидно, есть часть этой истории, которую мы упускаем из виду».

Уточнение того, какая из оставшихся теорий верна, — сложная задача, и споры на этот счет могут разгореться не на шутку. «Наилучший способ обрести друзей и врагов в области метеоритной астрономии — опубликовать еще одну модель образования хондр», — говорит Коннолли. Ставка здесь — роль, которую хондры сыграли в Солнечной системе. Если они были среди первых образовавшихся твердых тел, то вокруг молодого Солнца происходил

некий неотвратимый процесс, который помог бы объяснить, как формирование планет начинается вокруг практически любой звезды. А если нет, то неужели они менее важны для этого процесса, чем считалось ранее?

«Сегодня я делаю ставку на столкновения, — говорит планетолог Юджин Цян (Eugene Chiang) из Калифорнийского университета в Беркли. — И, если говорить совсем откровенно, это делает [их] немного менее интересными. Потому что если вас интересует формирование планет, это означает, что хондры — не самые примитивные объекты. Это вторичные продукты».

Как приготовить хондры

Большинство наших представлений о формировании хондр построены на основе моделирования ранней Солнечной системы и проведения экспериментов на Земле с целью воспроизведения различных методов формирования. Изучающая метеориты научный работник Манчестерского университета Эйми Смит (Aimee Smith) с коллегами представляют

одну из нескольких в мире научных групп, которые проводят подобные эксперименты, смешивая химические вещества в порошок так, чтобы по составу он был похож на известные типы хондр. Затем они помещают порошок в печь и нагревают его до чрезвычайно высокой температуры от нескольких часов до нескольких дней, а затем охлаждают, чтобы имитировать различные модели формирования хондр. «Если мы получим хондры, похожие на естественные, которые мы хорошо изучили, то лучше поймем, как они образовались», — говорит Смит.

Эксперименты вроде этого проводятся совместно с работой по моделированию Солнечной системы. «Эти эксперименты просто определяют условия, необходимые для [формирования] хондр, — объясняет Риан Джонс, один из сотрудников Смита. — А модели пытаются представить сценарии, в которых эти условия выполняются». Такое моделирование позволяет начать рисовать новую картину самых ранних моментов жизни Солнечной системы.

Недавно проведенная работа по измерению соотношения изотопов в метеоритах указывает на то, что на раннем этапе сформировались два разных источника хондритов — один во внутренней Солнечной системе и один во внешней, где хондры могли образовываться независимо друг от друга. Эти две различные группы хондритов перемешались после того, как Юпитер, первоначально сформировавшийся более чем в два раза ближе к Солнцу, мигрировал в его нынешнее положение, — идея, названная гипотезой большой миграции орбиты. Если это действительно так, то у нас есть все основания предположить, что хроника бурной истории Солнечной системы хранится в самих хондрах, и это — еще одна причина для того, чтобы уделить им пристальное внимание.

С другой стороны, наблюдения иных планетных систем, в частности протопланетных газовой-пылевых дисков вокруг молодых звезд, дают информацию о возможных сценариях образования хондр. В 2014 г. астрофизик Хуань Мэн (Huan Meng), тогда еще аспирант Аризонского университета, и его коллеги сообщили о вспышке инфракрасного излучения около звезды *NGC-2547 ID8* на расстоянии более 1 тыс. световых лет от Земли — свидетельство возможного столкновения протопланет. Хотя это и не связано непосредственно с образованием хондр, наблюдения по крайней мере показали, что энергичные столкновения подобного рода, по всей видимости, действительно происходят в молодых планетных системах. «До [нашей] статьи у нас не было прямых

твердых свидетельств каких-либо столкновений планет вне Солнечной системы», — говорит Мэн.

В будущем, полагают, астрономы смогут исследовать распределение пыли вокруг молодых звезд с помощью изображений с более высоким разрешением, что, вероятно, позволит уточнить некоторые модели образования хондр. «Благодаря совершенствованию методов и телескопов теперь мы можем начать наблюдения образования пыли вокруг молодых звезд, — рассказывает Ив Маррокки (Yves Marrocchi), планетолог французского Национального центра научных исследований. — Возможно, в ближайшем будущем мы сможем наблюдать [процесс] формирования хондр». Одним из таких телескопов, возможно, станет долгожданный космический телескоп «Джеймс Уэбб» NASA, запуск которого запланирован на октябрь этого года.

Если хондры были среди первых образовавшихся около звезд твердых тел, то они, возможно, стали важнейшим катализатором последующего формирования планет, в частности скачка от объектов размером с пылинку к небесным телам размером в километр. «Есть стадия, когда для того, чтобы сформировать каменные родительские тела планет, вам необходимы объекты размером от нескольких метров до километра, — говорит Коннолли. — То, что происходит на этой стадии, становится действительно важным». И, возможно, хондры даже более важны. Согласно одной из моделей образования планет — так называемой «галечной аккреции», — более крупные тела собирают к себе мелкую гальку, чтобы в конечном итоге превратиться в планеты. Возможно ли, что эти гладкие камешки — хондры? «Мы не знаем, они ли это», — говорит Андре Изидоро (André Izidoro), планетолог из Университета Райса. По его словам, для этого, вероятно, требуется «большой кусок астероида». И вот, оказывается, мы только что его получили.

«Одной фразой не ответить»

Первые оценки показали, что «Хаябусе-2» удалось привезти с собой более 5 г вещества астероида Рюгу. По словам Соگو Татибаны (Shogo Tachibana), возглавляющего группу анализа образцов Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA), этого должно быть более чем достаточно, чтобы увидеть, присутствуют ли там хондры. Он и его группа начали изучать образцы в начале этого года, после того как их доставили из Австралии в Японию. Большая часть их результатов еще не опубликована. «Мы не знаем, отличаются ли хондры Рюгу от типов хондр других хондритов», —

говорит Татибана. Рюгу, по-видимому, напоминает углеродистые хондриты, найденные на Земле, поэтому большинство экспертов ожидают, что в образцах хондры будут присутствовать, но на момент написания этой статьи никто еще не знает, будут ли они похожи на те, которые уже имеются в коллекциях, или окажутся непохожими ни на одни из когда-либо виденных ранее.

Возможно, образцы «Хаябусы-2» вообще не содержат хондр. «Я думаю, это будет шоком для сообщества, занимающегося изучением хондр», — считает Хербст. «Если хондр нет и будет выглядеть так, как будто хондр в них никогда не и было, то, возможно, образование хондр — не такой уж и повсеместный процесс», — объясняет Расселл.

Полученные ранее данные со спускаемого модуля, получившего название «Мобильный разведчик на поверхности астероидов» (MASCOT), который опустился с «Хаябусы-2» на Рюгу в октябре 2018 г., уже заинтриговали ученых. Изображения с посадочного модуля показали множество белых отметин на поверхности, которые могут быть белыми включениями, но также и хондрами. «Мы были удивлены, что действительно увидели [эти отметины] и что их было так много», — говорит Ральф Яуманн (Ralf Jaumann), руководитель научной группы MASCOT в Немецком аэрокосмическом центре (DLR), космическом агентстве Германии. Только химические исследования образцов, проведенные на Земле, покажут природу этих отметин.

Если в образцах «Хаябусы-2» есть хондры и если они аналогичны хондрам, которые специалисты уже изучили, можно будет точно определить место, время и, возможно, даже условия, в которых они образовались. Однако если образцы содержат новые типы хондр, это, возможно, позволит по-новому взглянуть на более сложную проблему происхождения Солнечной системы. Ученые, такие как Коннолли, приветствовали бы такой сценарий. «Я очень надеюсь, что нас ждут несколько сюрпризов и мы найдем объекты, которых не ожидали», — говорит он. И даже если хондр там нет, это может просто означать, что благодаря теплу, выделявшемуся в результате радиоактивного распада, столкновений и по другим причинам, лед превратился в воду, которая давно стерла свидетельства существования хондр, аналогично тому, как это случилось с CI-хондритами, найденными на Земле.

«Хаябуса-2» — не единственная космическая экспедиция по получению образцов с дарами из космоса, которых ждут ученые-хондрологи. Космический зонд NASA OSIRIS-REx

должен вернуться на Землю в сентябре 2023 г. с недавно собранными образцами другого астероида, называемого Бенну, который, как предполагают, богат хондрами. «Будет очень досадно, если мы не обнаружим хондр в его веществе, — говорит Коннолли, который также входит в состав научной группы экспедиции OSIRIS-REx. — Я жду не дожусь возможности найти как известные мне хондры, так и неизвестные».

Если ученым когда-либо удастся окончательно установить, как образовались хондры, это, возможно, станет большим шагом вперед к выяснению того, были ли они критически важным элементом для последующего формирования Земли и других небольших планет нашего Солнца. Если, конечно, предположить, что история их формирования, которую удастся раскрыть в конечном итоге, сравнительно проста. Некоторые эксперты, однако, подозревают, что простых решений найти не удастся, отчасти потому, что верны несколько теорий. «Я думаю, что ответить на этот вопрос одной фразой нельзя, — говорит планетолог Сара Стюарт (Sarah Stewart) из Калифорнийского университета в Дейвисе. — Вероятно, было много капель, которые создавались различными способами». Расселл соглашается: «Моя любимая теория состоит в том, что правы все. Все эти процессы происходили где-то в Солнечной системе. Были ударные волны, были столкновения, были головные скачки уплотнения, были молнии. Я думаю, все это было и все вело к образованию объектов, похожих на хондры».


Это может означать, что Вуд был на правильном пути, когда сделал свое печально известное, завершившее его карьеру заявление о тщетности: если почти каждая идея образования хондр отражает процесс, который действительно наличествовал в ранней истории Солнечной системы, то, возможно, между ними нет существенного различия. Но такая возможность не заставит новые поколения прекратить попытки — и они продолжают дело своих предшественников. «Если бы мне пришлось начать все заново, я попытался бы сделать то же самое», — говорит Вуд. А что касается тех, кто пойдет по его стопам? «Я пожелаю им удачи». ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Chondrites and Chondrules. John A. Wood; October 1963.





Древний мегаполис Чатал-Хююк в Турции на протяжении десятилетий был центром археологических исследований

АРХЕОЛОГИЯ

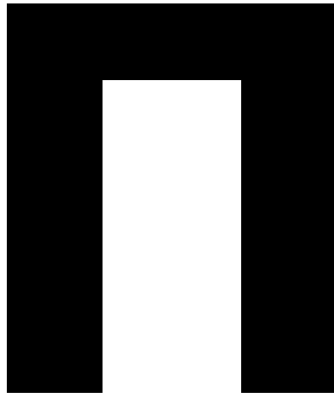
Истоки Дома

Город возрастом в 9 тыс. лет раскрывает секреты того, какой была наша жизнь на заре оседлости

Аннали Ньюиц

ОБ АВТОРЕ

Аннали Ньюиц (Annalee Newitz) — журналистка и писательница, живет в Ирвайне, штат Калифорния. Последняя вышедшая книга — «Четыре затерянных города: тайная история эпохи урбанизации» (*Four Lost Cities: A Secret History of the Urban Age*, 2021).



лато Конья (Ликаонская равнина) в центральной Турции — обширная возвышенная равнина, покрытая небольшими фермами и пыльными полями, театрально обрамленная горными цепями, отбрасывающими пурпурные тени. Ночью в предгорьях можно увидеть далекие огни города, мерцающие, словно миражи. За последние 9 тыс. лет эта картина не сильно изменилась, и путешественнику из 7000 г. до н.э. эта освещенная линия горизонта, испещренная городскими огнями, покажется знакомой. Дело в том, что Ликаонская равнина — одна из колыбелей городской жизни.

За тысячелетия до возникновения юго-восточнее месопотамских городов здесь процветал протогород Чатал-Хююк (тур. *Çatalhöyük* — «виллообразный холм»). Занимая более 14 га земли с населением около 8 тыс. человек, он был мегаполисом своего времени. Люди жили здесь постоянно на протяжении 2 тыс. лет вплоть до 5000-х гг. до н.э., когда городское население медленно пошло на убыль. В период же расцвета костры многочисленных ночных празднеств Чатал-Хююка были бы видны далеко на равнинах.

В отличие от более поздних городов в Чатал-Хююке не было ни значительных памятников, ни рынков. Скорее он представлял собой дюжину сельскохозяйственных деревень, которые выросли вместе, образовав то, что некоторые исследователи называют «мегаполисом». Тысячи домов из сырцового кирпича строились очень близко друг к другу, часто вплотную. Вход располагался на крыше, а привычные дороги и тротуары, по всей вероятности, проходили прямо по крышам домов. Здесь же были разбиты и небольшие фермерские участки. Чем бы

ни занимались жители Чатал-Хююка, от починки одежды или строительства до приготовления еды или создания украшений, большую часть времени они проводили либо в четырех стенах, либо — в теплые месяцы года — на крышах своих домов.

Все это стало полной неожиданностью для археологов, начавших раскопки в Чатал-Хююке в первой половине 1960-х гг. Основываясь на исследованиях других древних городов, они рассчитывали найти рынки, святыни, предметы роскоши, религиозные артефакты. Вместо этого они обнаружили элементы домашнего декора, посуды и предметов, связанных больше с домашним хозяйством, чем



с религией. Несоответствие между ожиданиями и реальностью не одно десятилетие приводило в замешательство исследователей Чатал-Хююка. Чтобы понять, что все это значит, и собрать все свидетельства жизни людей, переходящих от кочевого существования к оседлому, понадобился новый тип археолога.

Дом Дидоны

В 2000 г. археолог Рут Трингем (Ruth Tringham) из Калифорнийского университета в Беркли приехала в Чатал-Хююк, чтобы посетить дом, который не видел света в течение тысяч лет. Внутри она обнаружила останки женщины, похороненной под платформой, на которой размещалась кровать. Трингем дала ей прозвище Дидона и каждое лето в течение следующих нескольких лет возвращалась с группой ученых для проведения исследований и раскопок в этом доме. Группа проанализировала все — от найденных внутри костей и фигурок животных до множества слоев алебастрового покрытия на стенах.

Это был дом, в котором все было сделано буквально с нуля. Современному человеку трудно представить себе объемы и интенсивность труда, необходимого для поддержания оседлой жизни во времена Дидоны. Если вы хотели приготовить ужин, вы выращивали или добывали еду, строили собственную печь, изготавливали инструменты для приготовления пищи (такие как обсидиановые ножи, глиняные горшки) и лишь затем могли готовить. Люди сами делали кирпичи из глины, строили дома, ткали циновки из тростника и шили себе одежду (то есть сами делали иглы, нитки и ткани).

Подобный ручной труд находил отражение и в нематериальных сторонах жизни. Обитатели этого древнего города хоронили своих близких прямо в доме, под полом, возможно, чтобы держать их поближе, а их черепа благоговейно покрывали алебастром и краской. Похожие черепа были найдены и в других местах, относящихся к эпохе неолита (период от 12 тыс. до 6,5 тыс. лет до н.э.), в регионе, известном как Плодородный полумесяц (дельта Нила, низины Тигра и Евфрата). Есть основания считать, что в те древние времена было довольно распространено почитать память мертвых, воссоздавая их лица при помощи своеобразных помертных масок из алебастра, наложенного на черепа. В Чатал-Хююке, по всей вероятности, эти черепа могли переносить из дома в дом и хоронить позднее. Исследователи часто находят несколько черепов, захороненных рядом с одним телом. Можно предположить, что эти ритуалы связывали родственников с их домами на протяжении нескольких поколений.

На внутренних стенах домов археологи обнаружили искусно сделанные рисунки, которые обновлялись каждый год, словно поколения жителей

хотели сохранить оригинальные картины нетронутыми. Некоторые из этих росписей представляют собой абстрактные узоры в виде завитков или зигзагов — древний эквивалент обоев. Другие изображают сцены с участием диких животных



Большинство домов в Чатал-Хююке были украшены костями животных, такими как черепа быков (1). Стены покрывали изысканные росписи (2). Воссозданный интерьер типичного дома показывает, как под одной крышей уживались предметы религиозного культа и домашнего обихода (3).



и охотников. Есть даже некоторые росписи, которые, по всей вероятности, проливают свет на сущность обряда похорон: в одном доме исследователи нашли настенную роспись с обезглавленными телами в окружении стервятников. Создается впечатление, будто души людей уносят птицы.

Дома украшали и костями животных. Практически в каждом жилище был свой настенный «букракий» — череп быка, покрытый алебастром и выкрашенный в темно-красный цвет, чьи острые рога были направлены внутрь комнаты. В глиняные кирпичи, из которых строились стены, также нередко включались когти и зубы животных — подобно этому люди и сегодня кладут счастливую монетку в фундамент будущего дома.

В 1960-х гг. археологи были сбиты с толку, обнаружив эти явно символические, квазирелигиозные предметы, смешанные с обычным бытовым мусором. Один из первых исследователей Джеймс Мелларт (James Mellaart) считал, что весь город представляет собой гигантское таинственное святилище. Однако «не стоит видеть в этом нечто излишне таинственное и сложное, — уверена Трингем, — иначе легко впасть в мистику». Мелларт и его коллеги ожидали найти религиозные артефакты в величественных храмах, а не на кухнях людей. Трингем же всегда предпочитала, чтобы свидетельства говорили сами за себя, без преубеждений.



Дом был не только жилищем, местом отдыха, но и пространством для работы и обрядов. Обнаруженные под полом скелеты свидетельствуют о религиозной составляющей в концепции дома (1). Глиняные шары (2), возможно, помогли разогреть пищу или согреть людей. Глиняные горшки (3) и обсидиановые ножи (4) свидетельствуют о приготовлении пищи.

Археолог Стэнфордского университета Иэн Ходдер (Ian Hodder), руководивший раскопками в Чатал-Хююке до 2018 г., поддержал точку зрения Трингем. Традиционно работа с археологическими артефактами сводилась к их «краже» с места раскопок (порой буквально), последующему изучению и водворению в музей. Ходдер популяризировал идею «контекстной археологии», которая предполагает, что мы должны изучать артефакты не изолированно, а в контексте того места, где они были обнаружены. В случае раскопок Чатал-Хююка контекстная археология дала таким исследователям, как Трингем, подсказку в ответе на вопрос, как священные предметы попали в жилые помещения. По сути, ответ заключался в том, что ритуальные пространства создавались людьми прямо в своих домах.

В отличие от более поздних городов, где существовало четкое разделение между местами для обрядов, работы и повседневной жизни, в Чатал-Хююке все это было объединено буквально под одной крышей. Здесь каждый дом представлял собой сочетание храма, мастерской и спальни. Ходдер считает, что появление этих многоцелевых помещений представляет собой ключевой этап в процессе одомашнивания человека, в его переходе от кочевого к оседлому образу жизни. Сначала дома были просто местом для сна и работы. Но со временем, по словам Ходдера, люди психологически запутались в своей земле и из кучки фермеров Ликаонской равнины превратились в «чаталистов». Город стал частью их самобытности, а место жительства обрело духовное значение. Четыре стены с крышей перестали быть лишь местом, где можно согреться или укрыться от непогоды, и стали домом. Несмотря на то что в более поздних городах возникло разделение пространства на места для проведения обрядов, работы и домашней жизни, идея города-дома (а не просто места отдыха) продолжала существовать.

Суп быстрого приготовления в неолите

Чатал-Хююк показывает, на что была похожа повседневная жизнь в те времена, когда «дом» был радикально новой идеей. Чтобы сохранить свои дома и семьи, жителям города приходилось много работать, но большую часть времени они тратили на приобретение и приготовление еды. Мы знаем, что они были земледельцами и животноводами, пасли стада на плодородной Ликаонской равнине, что обеспечивало их стабильным продовольствием, необходимым для круглогодичного проживания в городских домах. Они изготавливали самые разные кухонные принадлежности — от ножей для разделки мяса до суповых тарелок. Сегодня благодаря высокотехнологичному анализу их глиняных горшков мы знаем, что они ели.

«Это было похоже на детектив», — так археолог Ева Розеншток (Eva Rosenstock) со смехом описывает, как она и ее коллега Джессика Хенди (Jessica Hendy) использовали методы криминалистики для извлечения контрольных молекул древней пищи, прилипшей к внутренней части посуды. Розеншток — научный сотрудник Центра Эйнштейна *Chronoi* в Берлине, занимающаяся изучением продуктов питания и здоровья в эпоху неолита. Она познакомилась с Хенди несколько лет назад на конференции, где та делала доклад об исследованиях отложений кальция на зубной эмали, по которым можно определить, что ели люди в Средние века. Внутри этого кальция оказались следы липидов и белков, имеющих во всех живых существах, включая тех, которые мы едим. Хенди удалось идентифицировать средневековые продукты, сравнивая молекулярные структуры

липидов и белков на грязных зубах людей с молекулярными структурами известных животных и растений.

Этот доклад вдохновил Розеншток. Она изучила несколько фрагментов глиняной чаши из Чатал-Хююка, на внутренней стороне которых был обнаружен тонкий слой кальцита, напоминавшего, по ее словам, «известковый налет в современных чайниках». Она убедила Хенди исследовать эти фрагменты на предмет молекул, которые позволили бы определить блюда из меню эпохи неолита.

Первые результаты исследований оказались обескураживающими и показали совпадение образцов с экзотическими аквариумными рыбками и цветами лотоса (вероятно, из-за загрязнения образцов современными молекулами). К счастью, дальнейшие исследования обнаружили куда более реальные молекулярные соответствия с продуктами питания. Розеншток, Хенди и их коллеги нашли следы гороха, пшеницы, ячменя, а также коз, овец, крупного рогатого скота и даже некоторых видов оленей. Но самым интересным открытием стало молоко, ведь речь шла об историческом периоде, когда у большинства людей еще не возникла генетическая мутация, позволяющая усваивать молочные продукты во взрослом возрасте. Найденные в Чатал-Хююке следы молока стали одними из самых старых из когда-либо обнаруженных. Это не означает, что жители Чатал-Хююка болели так же, как современные люди, не переносящие лактозу. Недавние исследования показывают, что микробиом кишечника (все микроорганизмы, живущие в нашем кишечнике) может помочь нам переваривать молоко. Вероятно, исследователям глиняной чаши из Чатал-Хююка просто удалось зафиксировать момент, когда взрослые люди начали готовить пищу с использованием молока. В течение следующих тысяч лет мутация, помогающая взрослым людям переваривать молочные продукты, распространилась по Европе и на Ближнем Востоке.

По мнению Розеншток, эти остатки молока также свидетельствуют о древней стратегии экономики труда. В эпоху неолита молочные продукты были сезонными. Животные рожали весной, а к зиме молоко у них пропадало. Чтобы наслаждаться молоком круглый год, в разных странах мира начали изобретать сыр и другие кисломолочные продукты, которые можно хранить долгое время. В Турции и близлежащих регионах популярностью пользуется блюдо из сухого кислого молока, известное как «курут» или «кашк», часто имеющее форму небольших шариков, иногда растертое в порошок; для придания вкуса молоко можно также ферментировать вместе с измельченными злаками. Жители Чатал-Хююка могли готовить подобное блюдо. «Очень удобная вещь, не портится в течение многих лет, — говорит Розеншток. — Бросьте несколько шариков курута в кипящую воду,

и получится суп быстрого приготовления!». Идеальное горячее блюдо в холодный зимний день, когда никто не хочет выходить на улицу, на свою ферму или на охоту.

Тайна глиняного шара

В арсенале ремесленников Чатал-Хююка были и другие приемы для экономии труда. Примерно 8,5 тыс. лет назад, несколько столетий спустя после основания города, была изобретена керамика, появились первые изделия из обожженной глины. Для поваров эпохи неолита это было столь же революционное открытие, как для самых нетерпеливых и голодных — изобретение микроволновых печей в 1970-х гг. До появления керамики приготовление пищи было исключительно трудоемким процессом. Антрополог из Массачусетского университета в Амхерсте Соня Аталай (Sonya Atalay) доказала, что тушеные блюда той эпохи готовили в водонепроницаемых плетеных корзинах. Нужно было налить в такую корзину воду, положить ингредиенты и бросить специальные заранее раскаленные камни или глиняные шары. Когда эти шары остывали, их вынимали и заменяли новыми. Вне всяких сомнений, это был утомительный и трудоемкий процесс, завершавший долгий день сбора и добычи еды и воды.

Эту картину «предкерамической» кухни Аталай основывает на двух источниках. Во-первых, подобные методы приготовления пищи входят в кулинарные традиции некоторых современных культур. Во-вторых, во время раскопок в Чатал-Хююке было найдено огромное количество больших глиняных шаров размером с грейпфрут, покрытых следами воздействия огня. В некоторых домах их сотнями находят в очагах и вокруг них. Аталай казалось очевидным, что эти глиняные шары используются для приготовления пищи.

После «керамической революции» в Чатал-Хююке производство плетеных корзин и глиняных шаров для приготовления пищи пошло на спад. Керамические горшки оказались достаточно термостойкими, их можно было разместить прямо над огнем, чтобы тушить мясо в течение долгого времени. Должно быть, именно такими были первые признаки роскоши: возможность готовить еду, не жонглируя постоянно горячими глиняными шарами.

В этой истории есть только она загвоздка. Когда ученые проанализировали глиняные шары на наличие липидов и белков, подобных тем, которые были обнаружены на глиняной чаше Евой Розеншток, они ничего не обнаружили.

Шары, безусловно, нагревались и явно использовались на кухне, но при этом никогда не контактировали с пищей. Так для чего они были нужны?

Люси Беннисон-Чапман (Lucy Bennison-Charman), исследовательница из Лейденского университета в Нидерландах, потратила годы на анализ

этих глиняных шаров и сделала несколько удивительных открытий. Хотя она не может полностью исключить их использование в процессе приготовления тушеных блюд, этот вариант кажется ей крайне маловероятным: во-первых, шары были слишком большими, во-вторых, они неизбежно испортили бы еду кусочками глины и земли. Она также отвергает возможность того, что эти шары использовались как оружие. «Они отличаются от снарядов для пращи, — говорит исследователь. — Они меньше и имеют, как правило, другую форму».

Ее теория заключается в том, что эти шары служили обогревателями. В некоторых случаях ими выстилали дно домашних печей, чтобы дольше сохранять тепло. Они могли быть и аналогом «термоподносов» каменного века: нагретые шары накрывались тростниковыми циновками, а сверху выкладывалась еда. «На Ликаонской равнине зимой очень холодно, а эти шары можно нагреть и использовать как грелку: например, обернуть их льняной тканью и положить в постель, — объясняет Беннисон-Чапман. — Люди работали на крышах домов, в полях, и могли класть нагретые шары в карманы, пока были на улице. Это могло бы объяснить, почему их так часто повторно нагревали».

Изготовление этих многофункциональных шаров было достаточно трудоемким. «На шарах осталось множество отпечатков, их создатели долго разминали их руками» — говорит Беннисон-Чапман. Возможно, из-за того, что на их изготовление уходило много времени, шары использовались раз за разом, снова и снова нагревались на огне, пока не трескались. Среди найденных в Чатал-Хююке шаров целых оказалось очень мало. Некоторые перерабатывались и использовались для создания глиняных кирпичей или просто помещались в щели и между стенами, возможно, для лучшей теплоизоляции.

Глиняные шары играли и другую важную роль в древнем городе. Помимо больших «шаров-обогревателей» мастера создавали и миниатюрные шарики, которые иногда украшали точками или даже узорами. По мнению некоторых археологов, эти мини-шары или жетоны можно считать самыми ранними образцами «счетной системы», созданной в Чатал-Хююке, они предназначались для ведения записей или подсчета ресурсов. Однако Беннисон-Чапман предостерегает от поспешных выводов и говорит, что жетоны не предназначались для подсчета. Вероятнее, они служили игровыми элементами, гирями, ритуальными предметами или же просто украшением. Тем не менее эти маленькие шарики показывают, что домашняя жизнь не сводилась к приготовлению пищи и поддержанию комфорта. В итоге эти шарики из Чатал-Хююка привели к изобретению счета и письменной речи.

Нет места лучше дома

Неолит стал для человечества эпохой перемен, и скорость их все нарастала. Особенно когда дело дошло до определения того, что значит «быть дома». Примерно 12 тыс. лет назад лишь немногие люди жили в сельскохозяйственных поселениях круглый год. Большинство из них были кочевниками или полукочевниками. Объединяясь в небольшие группы, эти охотники-собиратели переходили с участка на участок в соответствии с сезонными изменениями и доступностью пищи. Когда же люди начали строить долговечные дома и формировать более крупные поселения, им пришлось искать новые способы сосуществования в одном месте, бок о бок с соседями.

Добиваться каких-то результатов стало возможно, лишь действуя сообща, разделяя друг с другом изнурительный труд и радости общения. В 2015 г. Джон Аллен (John Allen), антрополог из Индианского университета в Блумингтоне, выпустил книгу «Дом: как среда обитания сделала нас людьми» (*Home: How Habitat Made Us Human*). Автор пишет: «Дом — это пространство, к которому вы испытываете эмоциональную привязанность, становящуюся результатом привычного использования», — и добавляет, что люди строят дома, создавая ассоциативную связь между своим сообществом и конкретным местом. Возможно, в этом кроется

одна из причин, по которой могилы в Чатал-Хююке устроены прямо в домах. «Захоронение — особое место для семьи и близких людей», — утверждает Аллен, подчеркивая идею дома как не только физического, но и эмоционального пространства.

В поисках и описании продуктов, употребляемых в пищу в Чатал-Хююке, Розеншток не покидала одна мысль: твердое убеждение в том, что рано или поздно она и ее коллеги найдут доказательства существования пива в рационе древних людей. Отчасти это связано с тем, что археологи обнаружили свидетельства производства пива в других неолитических культурах по всему миру. Но помимо этого в Чатал-Хююке археологи нашли много свидетельств своего рода веселого образа жизни. «У них было невероятное количество глиняной посуды, они лепили ее и выбрасывали, как сумасшедшие. Кажется, что они ели и разбивали горшки, ели и разбивали, — говорит она. — А еще выкидывали кости, на которых еще оставалось мясо, так, как если бы они пировали и выпивали».

Строительство города — не только работа, но и праздники, и веселье. Возможно, на заре городской жизни работа и праздники были двумя сторонами одной медали, тем, что связывало нас в одном месте, которое мы называем домом. ■

Перевод: Д.С. Хованский

Выходит 6 раз в год

Познавательный журнал для хороших людей

Ослабление природной антиоксидантной защиты хрусталика глаза вызывает развитие катаракты из-за необратимого повреждения белков-кристаллинов

Монокристаллы из молекулярных магнетиков способны «дышать», менять свою окраску и даже прыгать при изменении внешних условий

Мощный современный метод исследования сложных химических веществ, включая биомолекулы, основан на явлении электронного парамагнитного резонанса, открытом в 1944 г. Е. К. Завойским

Риск летального исхода при клещевом энцефалите наиболее велик при заражении сибирским и особенно дальневосточным субтипами вируса

Причиной популяционного краха сокола-балобана стала древняя традиция соколиной охоты на дроф в странах Персидского залива

www.scfh.ru

ЭНЕРГЕТИКА

КАК ВЕРНО ИСПОЛЬЗОВАТЬ ПРИРОДНЫЙ ГАЗ

Масштабная инфраструктура газовой отрасли может стать препятствием для декарбонизации энергосистемы, но не обязательно — и вот почему

Майкл Уэббер



ОБ АВТОРЕ

Майкл Уэббер (Michael E. Webber) — профессор Техасского университета в Остине, специалист по энергетическим ресурсам и руководитель *Webber Energy Group*. Занимает должность главного специалиста по науке и технике в *ENGIE*, глобальной энергетической и инфраструктурной фирме в Париже, управляющей величайшей в мире независимой электрической компанией, а также крупными сетями поставки природного газа.



В середине десятих годов XX в. стало общепринятым считать, что природный газ станет топливом, позволяющим перейти к безуглеродному будущему, когда солнечные, ветровые и другие технологии использования возобновляемой энергии обеспечат становление всей нашей энергетики без выбросов углекислого газа, которые могут усугубить отрицательные последствия изменения климата. Но если природный газ действительно может быть мостом к обновлению, то это не входит в долгосрочные планы. И если мы действительно построим такой мост, то, скорее всего, застрянем на нем.

За последние 15 лет в США потребление природного газа выросло на треть. На газ приходится 32% общего потребления энергии, и в настоящее время он служит крупнейшим источником электричества в стране, в значительной степени вытеснив углесжигающие электростанции. Природный газ, прежде всего метан, горит намного чище, чем уголь, и обеспечивает удобную замену различным ветряным и солнечным электростанциям. Все это кажется многообещающим, если не считать того, что при сжигании природного газа все же выделяется CO_2 . Метан из скважин и трубопроводов может просачиваться в атмосферу, усиливая глобальное потепление. А когда закроется последняя угольная электростанция, газовые станции станут самыми грязными источниками электроэнергии.

Чтобы сократить выбросы углекислого газа, страны должны как можно быстрее обезуглеродить свои энергетические системы. Строительство новых ветряных и солнечных электростанций происходит быстро и относительно недорого, а также ускоряет закрытие угольных электростанций. Однако выбор лучших мест для их работ — продуваемых ветром равнин и выжженных солнцем пустынь — требует устройства значительно расширенной сети передачи электричества в крупные города и производственные комплексы. Многочисленные провода и столбы создают опасность во время ураганов, наводнений и пожаров, которые все усиливаются в ходе изменения климата, и поселок за поселком выступают против планов расширения таких сетей: «Только не на моем участке».

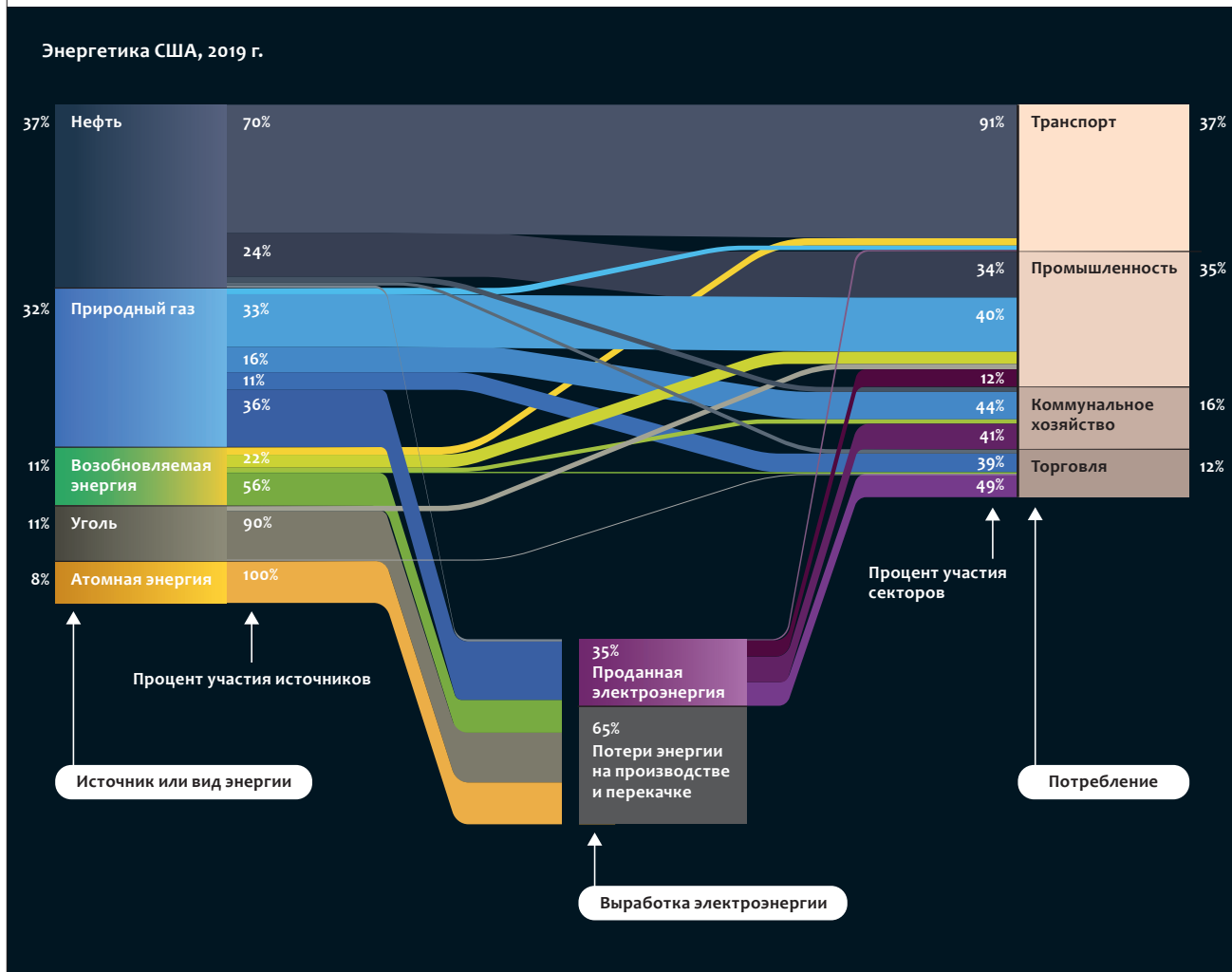
Инфраструктура использования природного газа, располагаясь в основном под землей, сравнительно мало подвержена сбоям. В США около 5 млн км газопроводов проходят почти под каждым крупным городом 48 штатов. После дополнительного учета всех компрессоров, топливных танков и каверн-газоохранилищ стоимость инфраструктуры возрастает до нескольких триллионов долларов. Сами электростанции прибавят к стоимости еще сотни миллиардов. Почти 70 млн домохозяйств, снабжаемых природным газом, имеют котлы центрального парового отопления, водонагреватели и варочные панели, добавляющие еще не менее \$100 млрд. Для расчетов в мировых масштабах увеличьте все эти невозвратные затраты примерно в пять раз. К тому же газовая отрасль более тесно, чем любой другой источник энергии, переплетается с другими секторами народного хозяйства: транспортным, строительным (здания и сооружения под отопление и приготовление пищи) и промышленным (топливная и химическая сырьевая отрасли), что затрудняет замену газа.

Замена газовой инфраструктуры до того, как закончится ее естественный срок службы, повлечет за собой и финансовые потери для нынешних владельцев. Замещающая технология может ввергнуть в расходы налогоплательщиков на разных уровнях и домовладельцев, которые также выразят несогласие. Большее количество электроэнергии не покрывает потребность в жидком топливе, сжигаемом в грузовиках, кораблях и самолетах,

Зависимость: в США потребляют большое количество природного газа

В США природный газ составляет 32% в структуре потребления энергии, уступая только нефти, и 31% в выработке электроэнергии, превышая любой другой источник. Газ также глубоко интегрирован в производственный, коммерческий и коммунальный секторы экономики, используется для промышленного теплоснабжения, как сырье в химической промышленности, для отопления помещений и нагрева воды,

приготовления пищи, а также выработки электроэнергии. При сжигании природного газа выделяется углекислый газ, а из газовых скважин и трубопроводов может происходить утечка метана, который подогревает атмосферу, поэтому декарбонизация системы и предотвращение утечек имеют решающее значение в ограничении влияния на климат.



или в интенсивном нагреве на сталелитейных и других промышленных предприятиях и нефтеперегонных заводах, производящих металлы, цемент, стекло, различные виды топлива, химикаты и т.д.

Если мы сможем очистить выбросы в системе использования природного газа, то она способна стать частью будущего с нулевым балансом эмиссии углерода. Существует технология извлечения CO₂ или преобразования газа, когда баланс выхода и поступления CO₂ равен нулю или близок к нулевому значению.

Первым шагом по генеральному плану декарбонизации энергетической инфраструктуры

страны должно стать повышение энергоэффективности и рациональное использование ресурсов, снижающее потребление. Второй шаг — перевести на электричество от возобновляемых источников энергии как можно больше автомобилей, отопительных приборов, водонагревателей и варочных панелей. В то же время необходимо устранить утечку газа в инфраструктуре, а также как можно больше использовать низкоуглеродные заменители природного газа, как то: биогаз, водород и синтезированный метан, или процесс, называемый пиролизом, на выходе трубопровода природного газа, чтобы удалять CO₂.

SOURCE: "U.S. ENERGY CONSUMPTION BY SOURCE AND SECTOR, 2019," BY U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA); Graphics by Darina and Jen Christensen

Сторонники экологически чистой энергии справедливо опасаются, что любые инвестиции в газовую инфраструктуру создают эффект блокировки. Предполагаемый срок службы каждой новой электростанции, трубопровода или газохранилища составляет от 25 до 80 лет, поэтому каждый компонент может стать западней, сохраняя большие выбросы, или замороженным активом. Но мы можем решить проблему блокировки, замещая природный газ низкоуглеродными газовыми аналогами, которые могут поступать по существующим трубам, наполнять хранилища и электростанции, и при этом можно воспользоваться преимуществом вложенных средств на триллионы долларов.

Газ с нулевым содержанием CO₂

Самым подходящим заменителем природному газу считается биометан — метан, получаемый из биологических материалов. Микробы внутри больших бочек, называемых анаэробными варочными котлами, перерабатывают органическое вещество растительных отходов, навоза, сточных вод, пищевых отходов и другого мусора со свалок, производя метан. Биогазовые реакторы относятся к уже испытанной технологии, они превращают потоки отходов со свалок и отстойников, прилегающих к предприятиям интенсивного откорма животных, в ценные товары, переводя экологические обязательства в доходы муниципалитетов и фермеров.

Биометан сейчас используется в Остине, штат Техас. Компания *Waste Management*, работая на одной из городских свалок, собирает биометан из 128 скважин на своем участке

и сжигает его, вырабатывая электроэнергию, достаточную для нужд 4–6 тыс. домов. На одной из городских очистных станций функционируют биогазовые реакторы емкостью 7570,82 м² каждый; микробы преобразуют сточные воды в биогаз, служащий топливом местным генераторам электроэнергии. Кроме того, образуется побочный твердый продукт, получивший название *Dillo Dirt*. На ощупь и по запаху он напоминает комковатый компост. Городской подрядчик продает его мешками в местных магазинах для обогащения почвы.

В настоящее время приблизительно на четверти из более чем 2 тыс. свалок США добывают газ или перерабатывают отходы в биогаз с помощью биореакторов. Однако это возмещает лишь менее 1% от общего объема потребления природного газа в стране. Биогаз может служить непосредственным заменителем природного газа, но относительная величина получаемого объема во всем мире мала. Если ферма, свалка или очистная станция не могут свободно использовать газ для производства электроэнергии или находятся вдали от газовой сети, биометан, возможно, придется сжигать и перевозить автотранспортом в другое место, что повышает издержки. Тем не менее производство биометана — это коммерчески готовая технология, с помощью которой можно начать декарбонизацию части газовой системы.

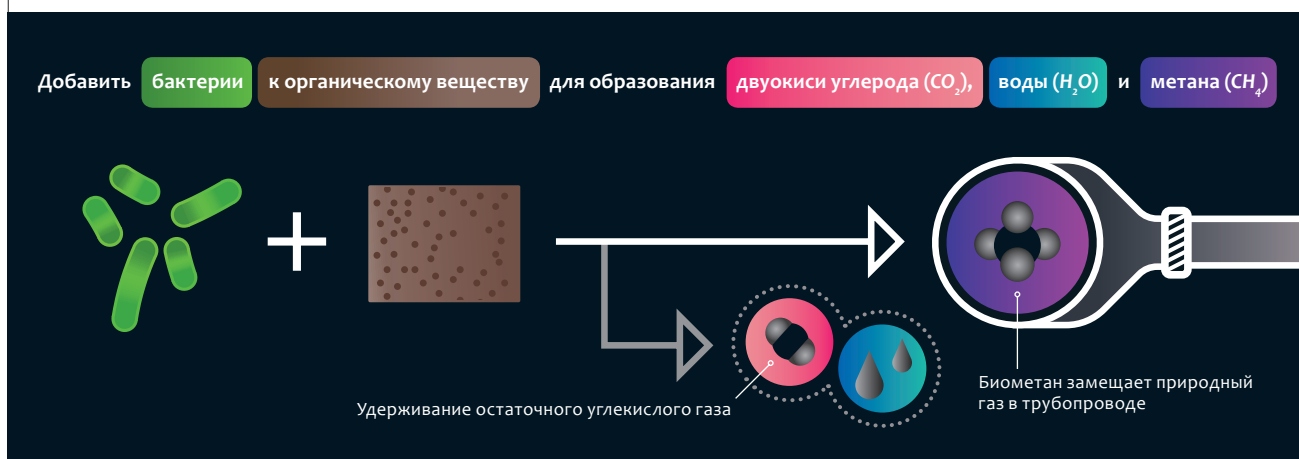
Водород вместо метана

Природный газ можно также заменить водородом. В турбинах можно сжигать водород, питая электросети, а в большегрузных автомобилях

Способы декарбонизации системы газоснабжения 1 Замена природного газа биометаном

Чтобы уменьшить выбросы CO₂ при сжигании природного газа, состоящего в основном из метана, в трубопроводе его можно заменить биометаном. Микробы внутри больших биогазовых котлов расщепляют органические вещества — растительные отходы, навоз, сточные воды или пищевые

отходы — с образованием метана, водяного пара и некоторого количества CO₂, последний улавливается для промышленного использования или подземного хранения. Если бы органический материал разложился естественным путем, CO₂ и метан попали бы в атмосферу.



2 Замена природного газа водородом

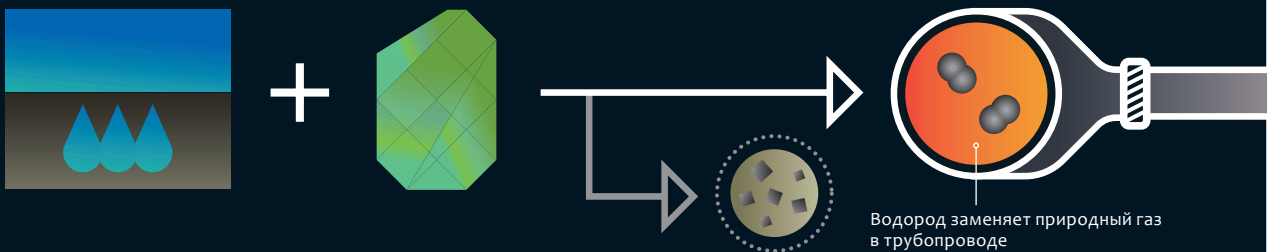
Природный газ в трубопроводе можно частично или полностью заменить водородом. Можно сжигать его на электростанциях и в большегрузных транспортных средствах, заправлять им топливные элементы автомобилей, жилых домов и зданий или использовать его в качестве промышленного

сырья. Сжигание водорода происходит без выделения углерода. Для транспортировки газа, содержащего более 20% водорода, потребуются специальные сплавы для изготовления труб. Ниже описано несколько источников получения водорода.

ПРИРОДНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ ГАЗА

Когда вода под землей контактирует с железосодержащими породами, они превращаются в силикаты с выделением водорода. Насосы могут также закачивать воду вниз для видоизменения горной породы.

Вода (H_2O) в природе реагирует с породами, содержащими железо, с образованием силикатов и водорода (H_2)



ОБРАБОТКА МЕТАНА ПАРОМ С ЗАХВАТОМ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

В результате добавления тепла и воды к метану, идущему из скважины, образуются водород и CO_2 , который может быть захвачен, а не выпущен. В промышленности уже широко используется этот процесс производства водорода для нефтеперерабатывающих и литейных заводов. А чистая энергия потребует для выработки тепла.

Добавить тепло к метану (CH_4) и пару (H_2O), чтобы получить двуокись углерода (CO_2) и водород (H_2)



ЭЛЕКТРОЛИЗ

Электричество, полученное из возобновляемых источников энергии, расщепляет воду, чтобы образовался водород. В данном случае требуется больше энергии, чем для парового преобразования метана, однако единственный побочный продукт — это кислород, который выпускается в воздух.

Добавить электричество в воду (H_2O) для образования кислорода (O_2) и водорода (H_2)



его могут использовать двигатели внутреннего сгорания. В топливных элементах водород может вырабатывать электричество для автомобилей, жилых домов или учреждений. Кроме того, водород — это готовый структурный элемент многих основных химических веществ. Его сжигание или участие в реакциях в топливных элементах не приводит к образованию CO_2 . Протечки водорода дают согревающий эффект для атмосферы в несколько раз меньше, чем от метана.

Природный водород выделяется из-под земли на многих древних платформах Земли (кратонах) — больших массивах древних горных пород, образующих центральные части континентов. Ученые наткнулись на эти выходы более века. Надо сказать, что нефтяные и газовые компании видели в водороде источник вреда, когда обнаруживали его наряду с подземными месторождениями, потому что он может воспламениться и повредить металлический трубопровод. Но сегодня научные работники корпораций и университетов бурят тестовые водородные скважины и запускают многолетние программы поиска водорода под землей. Их предвидение похоже на то, которое возникло на самых ранних этапах разработки сланцевых пластов: здесь есть огромный ресурс, если инженеры придумают, как применять его дешево и безопасно.

Водород можно также вырабатывать. В настоящее время большая часть промышленного водорода производится паровым преобразованием метана — добавлением тепла и горячей

воды к метану, чтобы образовать водород и диоксид углерода. В процессе электролиза — использования электричества для расщепления воды на водород и кислород — тоже можно получать газообразный водород. Однако оба процесса требуют значительного количества энергии.

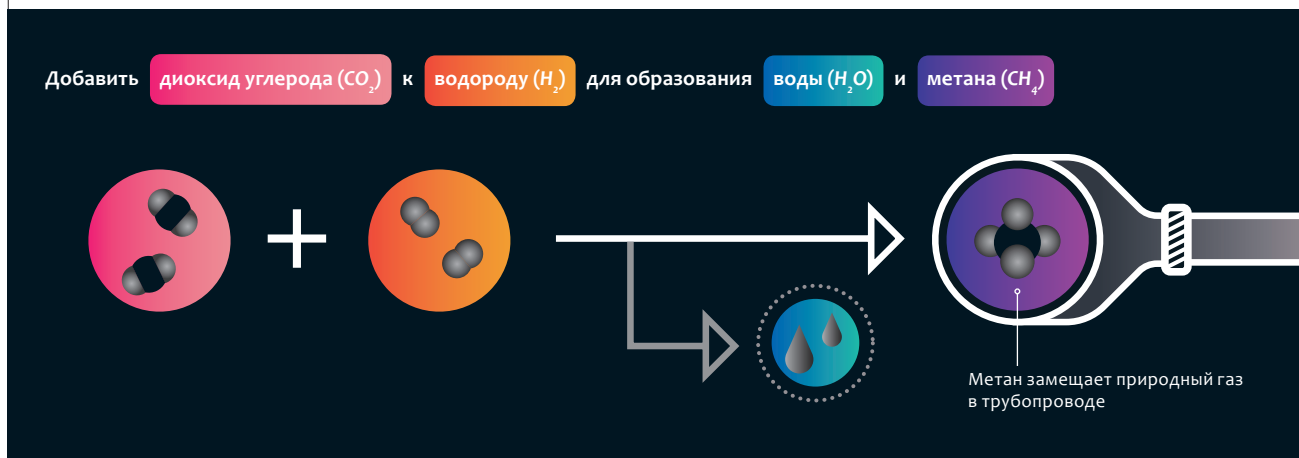
Перемещение и хранение газообразного водорода представляет собой еще одну проблему. Ввиду низкой плотности водорода на его перегонку по трубам затрачивается много энергии по сравнению с более плотными газами, такими как метан, или жидкостями, такими как нефть. Неэффективность транспортировки водорода становится очевидной на расстоянии в несколько сотен километров, когда прокачка стоит больше переносимой энергии. Кроме того, водород может сделать хрупкими стальные трубы, если только не смягчить условия эксплуатации или не включить дорогие сплавы.

Один из способов решения — присоединить водород, то есть смешать его с метаном в существующем газопроводе. Такое смешивание частично очищает систему от CO_2 за счет замещения водородом части природного газа. Эксперименты в Великобритании и Франции показывают, что смесь из 80% метана и 20% водорода можно эффективно перегонять по трубопроводу природного газа. В рамках исследования, ведущегося в Дюнкерке (Франция) с середины 2018 г. по март 2020 г., использовали смесь 80–20 для обеспечения топливом 100 жилых домов и бытового котла отопления без дополнительного оборудования вдоль трубопровода или в зданиях.

3 Перенос водорода в других химических формах

К «переносчикам» водорода относятся газы или жидкости, содержащие молекулы водорода, такие как муравьиная кислота (CH_2O_2), метанол (CH_3OH) или метан (CH_4). Вместо того чтобы извлекать природный газ и сжигать его с образованием CO_2 , технические средства, работающие на энергии возобновляемых источников, вытягивают CO_2 из воздуха или дымовых

труб, а затем соединяют его с водородом для образования носителя, который транспортируется по существующим трубопроводам. При его сжигании снова выделяется CO_2 , но, поскольку топливо было сделано с участием CO_2 , взятого из атмосферы, значения нетто-эмиссии низкие.



4 Извлечение углерода в местах потребления

Углерод может быть изъят из природного газа в конце газопровода, на стороне потребителя, а не в начале, на стороне поставщика. В процессе, называемом пиролизом, происходит расщепление поступающего метана с выходом газообразного водорода, использующегося в отопительных приборах, плитах или производственных установках,

при этом остается твердый угольный порошок, который вывозится из сборника потребителем или автоперевозчиком, его можно продать в качестве сырья для производства, например, батарей или удобрений. Метан расщепляют плазма, электрически заряженный газ (как в горящей неоновой вывеске) или тепло.



Детали оборудования печей и плит, такие как наконечники горелок, могут нуждаться в переделке или замене при применении смеси с более чем 20-процентным содержанием водорода, потому что, как и чистый водород, смешанный газ горит при других температурах и скоростях. Еще одно соображение заключается в том, что из-за низкой энергетической плотности 20-процентного водорода по объему смесь дает на 14% меньше энергии из расчета на 28 дм^3 , чем природный газ.

Один из способов обойти проблемы затрат и безопасности — перегонять по трубам водород в составе другой химической формы, с которой мы умеем обращаться, такой как аммиак, имеющий один атом азота и три атома водорода. Молекулы, содержащие атомы водорода, известны как его переносчики. Водород преобразовывается там, где его добывают или производят, затем он поступает в существующие трубопроводы и либо используется в этой форме, либо снова превращается в водород на месте назначения.

Обычные носители, такие как аммиак, муравьиная кислота и метанол, находятся в жидком состоянии в условиях, приближенных к окружающей среде, что облегчает их транспортировку по сравнению с газообразным водородом. Хотя аммиак — едкое вещество, он уже распространен по всему миру как компонент удобрений и его можно сжигать без образования CO_2 . Метан может быть выбран как наиболее эффективный, потому что он несет четыре атома водорода на каждый атом

углерода и уже совместим с существующими трубами, компрессорами, хранилищами, турбинами и оборудованием.

Количество демонстрационных проектов быстро множится. Финская промышленная строительная компания *Wärtsilä* к 2023 г. готовит новое судно *Viking Energy*, которое будет использовать аммиак в топливных элементах, избегая таким образом выбросов парниковых газов и других загрязняющих веществ, от которых страдает морское пространство. Авиакомпания *Air France* и аэропорт Париж — Шарль де Голль очень заинтересованы в использовании водорода для снижения выбросов CO_2 в авиации. Следует отметить, что носители водорода пока находятся на ранней стадии изучения, поэтому трудно сказать, насколько успешными могло бы быть их применение.

Электростанции, сжигающие водород, также остаются пока на чертежных досках. В Делте, штат Юта, одна из крупнейших в США угольных электростанций *Intermountain Power Plant* передает электричество за сотни километров в Лос-Анджелес. Чтобы удовлетворить городские потребности в возобновляемой и низкоуглеродной энергии на долгий срок, в 2025 г. владельцы электростанций заменят паровые котлы, использующие уголь, турбинами, которые могут сжигать водород. Они начнут с 30-процентной водородной смеси с природным газом, а позже перейдут на стопроцентный водород. Производство водорода будет осуществляться прямо на местах в процессе электролиза с использованием энергии ветра

и солнца, а хранение — в более чем 100 существующих подземных соляных пещерах, каждая размером с Эмпайр-стейт-билдинг.

На конце трубопровода

Вместо удаления CO_2 из природного газа перед его поступлением в трубопровод можно было бы изымать его в конце трубы, в местах потребления газа. Например, метан можно разделить в месте нахождения потребителя на водород и твердый углерод, который выглядит как тонкодисперсная черная пыль. Такой процесс, называемый пиролизом метана, эффективен и исключает выбросы двуокиси углерода. На каждый килограмм водорода, полученного при пиролизе метана, получается 3 кг твердого углерода вместо 9 кг газа CO_2 , который выделялся бы при сжигании метана.

Скопления сажи внутри коллектора в печи или на плите вывозятся раз в месяц или около того. Мы уже платим за вывоз мусора и очистку твердых и жидких отходов коммунальным службам; мы должны платить и за то, чтобы убирать отходы после использования газа. Надо сказать, что углеродные остатки на самом деле имеют ценность, потому что их можно продавать для использования в качестве основного ингредиента в производстве графита, резины, покрытий, батарей и химикатов, а также для улучшения структуры почв в сельском хозяйстве.

Инженеры изучали пиролиз метана десятилетиями, но использовали его только в небольших демонстрационных проектах. Некоторые приспособления на конце трубопровода надо будет заменить в целях удаления CO_2 , однако не придется строить дорогостоящих водородных трубопроводов, что значительно упрощает дело. Пиролиз обычного природного газа может вывести всю систему на почти нулевой уровень эмиссии углерода. Добавление в атмосферу метана из биореакторов или в виде произведенного из CO_2 с использованием возобновляемой электроэнергии могло бы довести систему до отрицательных показателей высвобождения углерода.

Любой из этих вариантов декарбонизированного будущего может быть представлен с участием новых крупных промышленных комплексов или миллионов небольших изменений оборудования со стороны потребителей. Надо сказать, что то же самое сопровождается и другие предложения по ограничению выбросов. Перевод на электричество каждого обогревателя, плиты и транспортного средства потребует широкомасштабной замены техники. Планы непосредственного извлечения CO_2 из воздуха включают применение миллионов больших

машин для улавливания газа и его хранения — разросшихся предприятий, которым также понадобится много новых земель и электроэнергии.

Лишенный диоксида углерода газ позволит нам воспользоваться вложениями на триллионы долларов в существующие трубопроводы, оборудование и электроприборы, при этом мы сэкономим огромные суммы денег и годы на создание энергетической системы с нулевым выбросом углерода. Нам, конечно, придется устранить дефекты инфраструктуры. Утечки можно свести к минимуму, заменив пневматическое оборудование электрическими механизмами на буровых площадках, усовершенствовав системы автоматического управления и контроля труб и резервуаров с помощью датчиков на беспилотных летательных аппаратах и роботах и создав инструкции, не позволяющие закрывать глаза на утечки, а также на преднамеренные выпуск или сжигание нежелательного газа. Благодаря возникновению новых обязанностей появятся дополнительные рабочие места для сотрудников нефтегазовой промышленности и станет чище энергетическая инфраструктура, что, в свою очередь, поможет снизить загрязнение в населенных пунктах, расположенных рядом с энергетическими объектами.

Для обуздания изменения климата надо принять множество решений. Заявление о невозможности участия, например, со стороны компаний по снабжению природным газом, только усиливает сопротивление прогрессу. Поскольку лишенный CO_2 природный газ может дополнить источники возобновляемой электроэнергии и предоставить нам более быстрый, дешевый, а также эффективный способ электрификации тех слоев населения, которые испытывают с этим трудности, мы не должны сбрасывать со счетов газ как вариант выбора. У нас огромная газовая инфраструктура, и мы должны разобраться, что с ней делать. Ее утилизация будет происходить медленно, дорого и невероятно сложно, однако вместо этого мы могли бы заставить ее работать, чтобы помочь создать будущее с низким уровнем выбросов диоксида углерода. ■

Перевод: В.И. Сидорова

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Burning Natural Gas. The Editors; June 23, 1888.

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



Самка темноспинного альбатроса по кличке Уиздом (Мудрость), впервые окольцованная в 1956 г., — старейшая из всех известных ученым птиц планеты

100 ЛЕТ КОЛЬЦЕВАНИЯ ПТИЦ

Богатейший архив данных проливает свет
на тайную жизнь птиц

Кейт Вонг

В

1902 г. Сотрудник Смитсоновского института Пол Барч (Paul Bartsch), занимавшийся изучением моллюсков, решал важную научную проблему: могут ли птицы переносить на своих ногах из одного водоема в другой пресноводных улиток? Для выяснения этого вопроса ученый разработал хитроумный план. Он взял легкие алюминиевые колечки, на которых были выгравированы текущий год, номер кольца и обратный адрес Смитсоновского института, и надел их на ноги 23 слеткам обыкновенной кваквы, пойманной на берегах реки Анакостии неподалеку от Вашингтона, округ Колумбия. Затем Барч принялся ждать известий об окольцованных птицах — где их видели, в какой ситуации и что с ними случилось.

Пол Барч получил сообщение лишь об одной из 23 окольцованных квакв. Птица была застрелена вскоре после кольцевания, но место ее гибели — город Абингдон в штате Мэриленд, в 88,5 км к северо-востоку от места кольцевания — указывало на маршрут перемещения кваквы. Довольно скромные результаты, но метод, использованный для их получения, был поистине революционным: Барч стал первым человеком в Северной Америке, начавшим систематически кольцевать птиц в научных целях.

На следующий год Барч оснастил кольцами с порядковыми номерами еще большее количество квакв, а вскоре в разных частях Северной Америки биологи начали кольцевать и птиц других видов.

В 1920 г. в США было образовано федеральное ведомство по кольцеванию птиц, известное сегодня как Лаборатория кольцевания птиц Геологической службы США. Эта организация, тесно сотрудничающая с аналогичной канадской службой, осуществляет Программу кольцевания североамериканских птиц, в распоряжении которой имеется более 77 млн архивных документов, связанных с кольцеванием пернатых, и более 5 млн записей встреч с окольцованными птицами за последнее столетие. Каждый год работники этой программы рассылают около 1 млн колец орнитологам-кольцевателям в США и Канаде и добавляют в свои базы данных примерно 100 тыс. новых отчетов о встречах с окольцованными пернатыми. Птицы могут

Полвека кольцевания

Лаборатория кольцевания птиц курирует все исследования в этой области орнитологии начиная с 1920 г. В 1959 г. многие из хранившихся здесь материалов уничтожил пожар, что стимулировало переход к электронному способу документирования информации. По практическим соображениям большинство реализуемых сегодня исследовательских проектов оперируют оцифрованными данными наблюдений за птицами, впервые окольцованными или повторно встреченными после 1960 г. Ниже показаны птицы, чаще всего упоминаемые в документах лаборатории — в 70 593 588 отчетах о кольцевании и в 4 134 060 отчетах о повторных встречах с окольцованными птицами за период с 1960 г. по 2016 г.

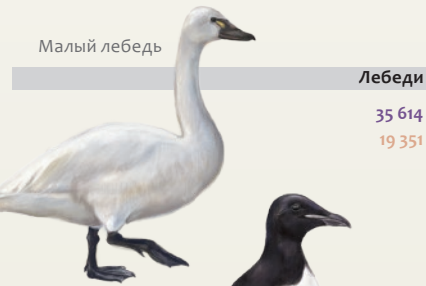
Показаны виды птиц разных групп, наиболее часто подвергавшиеся кольцеванию*



Группы птиц с общим числом кольцеваний менее 500 тыс.

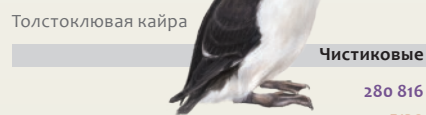
Черными столбиками отмечены годы, когда в той или иной группе птиц было проведено больше всего кольцеваний; в 1960 г. было окольцовано 1546 гагар и поганок.

Общее число кольцеваний: 31 945
Общее число встреч: 1586



Общее число кольцеваний: 35 614
Общее число встреч: 19 351

Этот прямоугольник показывает, что из числа птиц, окольцованных в 1982 г., две были позднее встречены наблюдателями.



Общее число кольцеваний: 280 816
Общее число встреч: 5120

Для мечения лебедей часто используются такие хорошо заметные издали метки, как «ошейники» и яркие ярлычки на крыльях, а потому, несмотря на сравнительно небольшое число кольцеваний, наблюдатели могли видеть каждую из этих птиц по много раз.



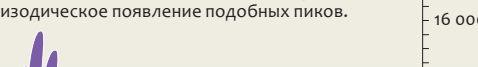
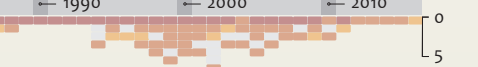
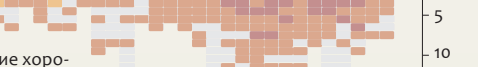
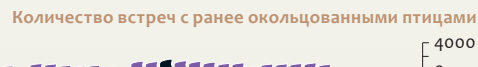
Общее число кольцеваний: 462 501
Общее число встреч: 8268

Кольцевание. Высота полосок соответствует количеству птиц каждой группы, окольцованных в разные годы.

Встречи. По вертикальной оси каждого блока показано число птиц, окольцованных в определенные сроки (горизонтальная ось) и позднее вновь встреченных наблюдателями. Цвет прямоугольников соответствует числу птиц.

- 1-4
- 5-49
- 0
- 50-499
- 500-4999
- 5000-49999
- 50000+

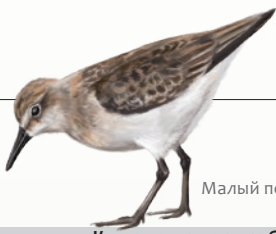
Окольцованные птицы



Практика кольцевания во многом зависит от конкретных целей исследований. Локальные особенности этой практики и определяют эпизодическое появление подобных пиков.

*Время от времени систематика птиц меняется: используемые здесь названия групп пернатых не соответствуют их современным обозначениям.

Группы птиц с общим числом кольцеваний более 500 тыс.

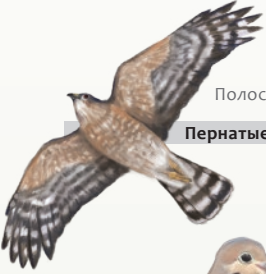
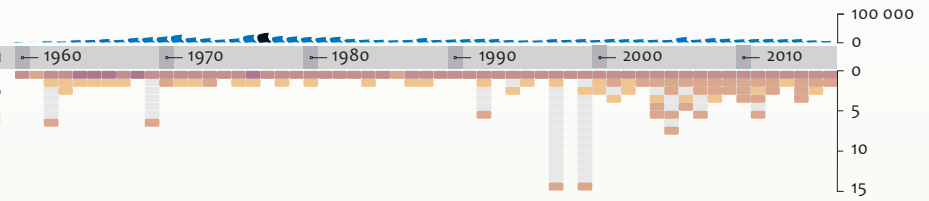


Малый песочник

Кулики и другие прибрежные птицы

Общее число кольцеваний: **885 736**

Общее число встреч: **14 091**

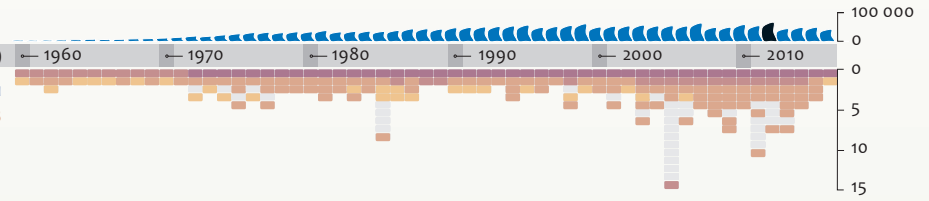


Полосатый ястреб

Пернатые хищники (включая сов)

2 077 121

59 838

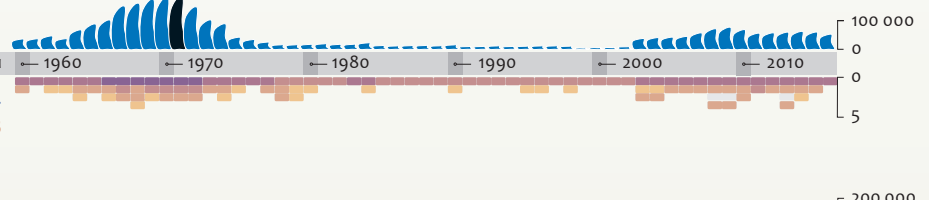


Плачущая горлица

Горлицы и голуби

2 798 024

123 735

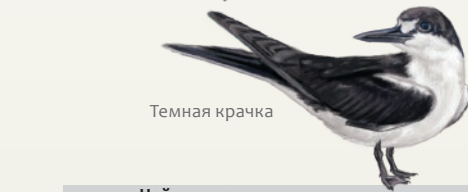
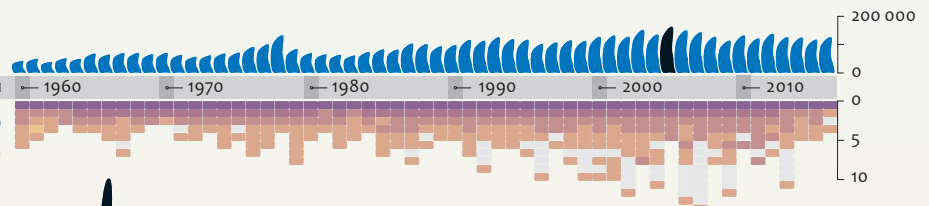


Канадская казарка

Гуси

5 636 160

1 385 582

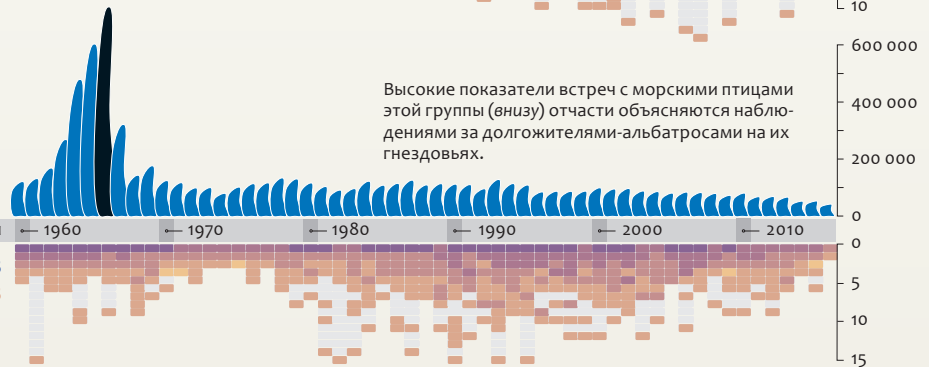


Темная крачка

Чайки, крачки и другие морские птицы

7 661 115

600 865

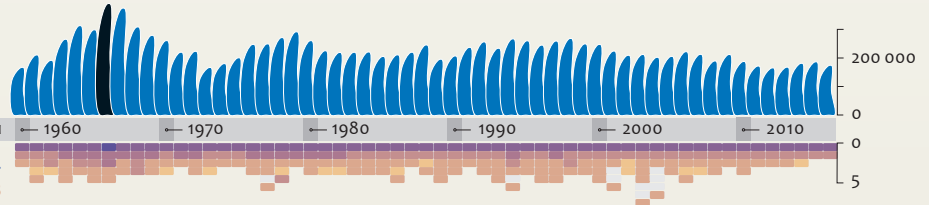


Кряква

Утки

13 156 364

1 715 418

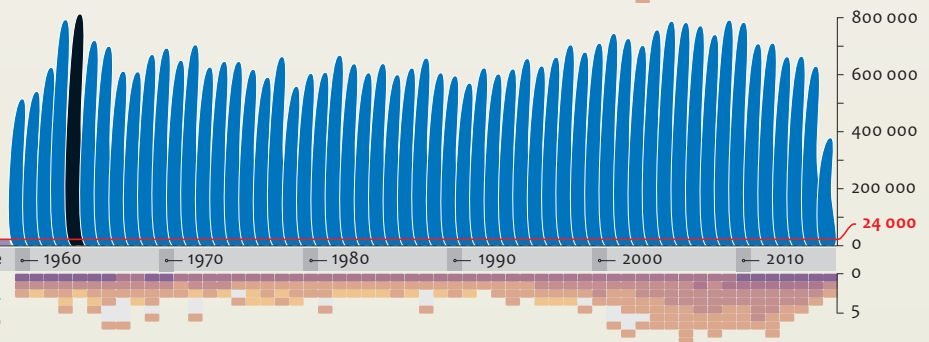


Серый юнко

Воробьинообразные

37 568 192

200 206



Птицы в движении

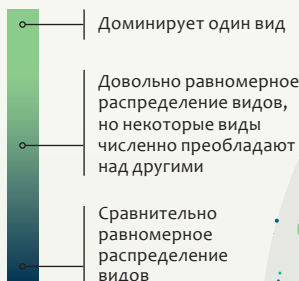
Информация, получаемая в результате многолетнего кольцевания птиц, помогает ученым выявлять изменения поведения пернатых, их популяций и местообитаний с течением времени. В свою очередь эти данные могут служить основой для разработки мер по защите животных и природной среды. Здесь мы приводим оцифрованные данные по кольцеванию птиц, проведенному в разных местах и в разные сезоны с 1960 г. по 2016 г.

КАК ЧИТАТЬ КАРТЫ

Размер каждого квадрата соответствует количеству определенного вида птиц, окольцованных в том или ином месте. Географические координаты этих точек (широта и долгота) даются в округленном виде.

1 тыс. ■ 50 тыс. ■ 500 тыс.

Цвет каждого квадрата определяется индексом разнообразия Шеннона.



Белыми кружками отмечены места, где было окольцовано наибольшее количество птиц за сезон. Так, за период с 1960 г. по 2016 г. к западу от Ниагарского водопада в Онтарио было окольцовано 436 875 птиц.

Голубым кружком отмечено место, где за сезон было окольцовано наибольшее число голубокрылых чирков.

ВЕСЕННЯЯ МИГРАЦИЯ

С 16 марта по 15 мая
Общее число кольцеваний:
8 591 942

Отслеживание болезни

Считается, что голубокрылые чирки играют определенную роль в распространении вируса птичьего гриппа, представляющего опасность не только для птиц и других животных, но и для людей. Ученые отслеживают перемещения чирков с целью выявления регионов, где эти утки могут передавать вирусы другим диким пернатым, а также домашней птице.



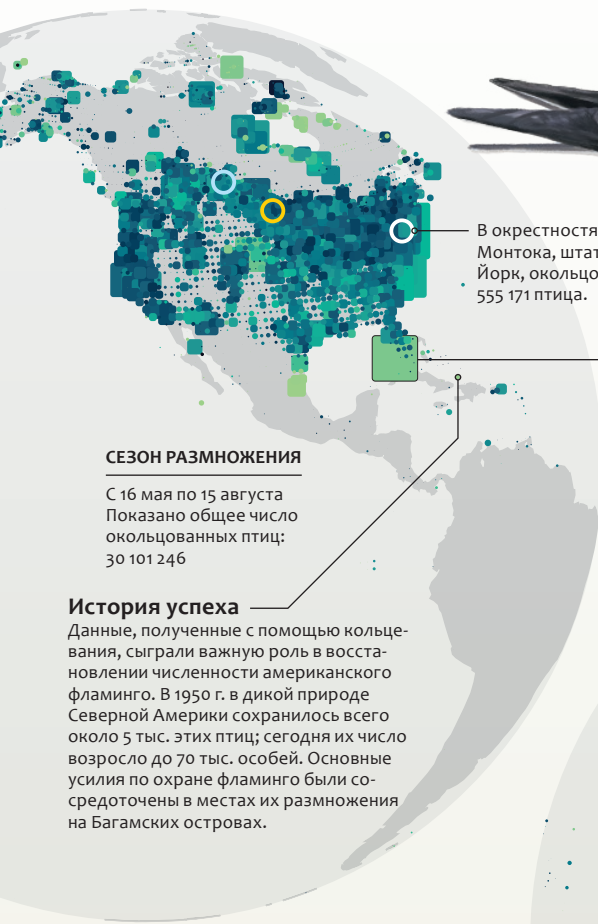
Голубокрылый чирок



Золотокрылый пеночковый певун

Исчезающий вид

Золотокрылый пеночковый певун — североамериканская перелетная певчая птичка, численность которой с 1960-х гг. сократилась более чем на 70%. Данные, полученные с помощью кольцевания, позволили ученым выяснить современное распространение этих маленьких пернатых, гнездящихся главным образом в районе Великих озер и гор Аппалачи, а зимующих в Центральной и Южной Америке. Кроме того, эти данные помогли выявить области с высокой плотностью популяций пеночкового певуна, которые могли бы стать охраняемыми зонами.



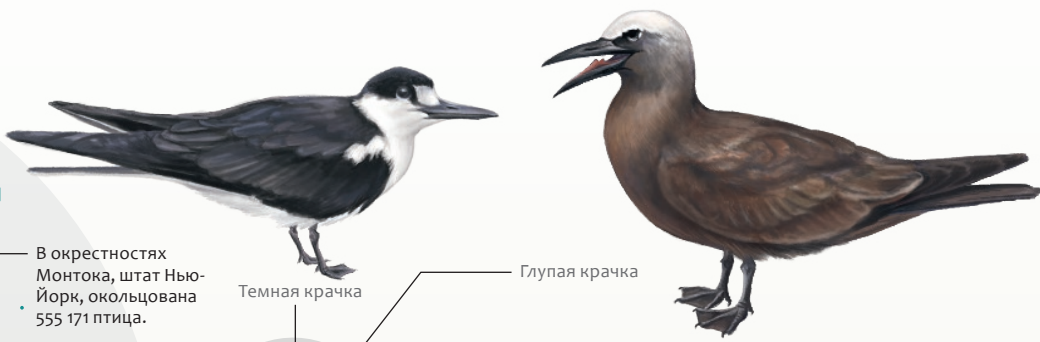
В окрестностях Монтока, штат Нью-Йорк, окольцована 555 171 птица.

СЕЗОН РАЗМНОЖЕНИЯ

С 16 мая по 15 августа
Показано общее число окольцованных птиц: 30 101 246

История успеха

Данные, полученные с помощью кольцевания, сыграли важную роль в восстановлении численности американского фламинго. В 1950 г. в дикой природе Северной Америки сохранилось всего около 5 тыс. этих птиц; сегодня их число возросло до 70 тыс. особей. Основные усилия по охране фламинго были сосредоточены в местах их размножения на Багамских островах.



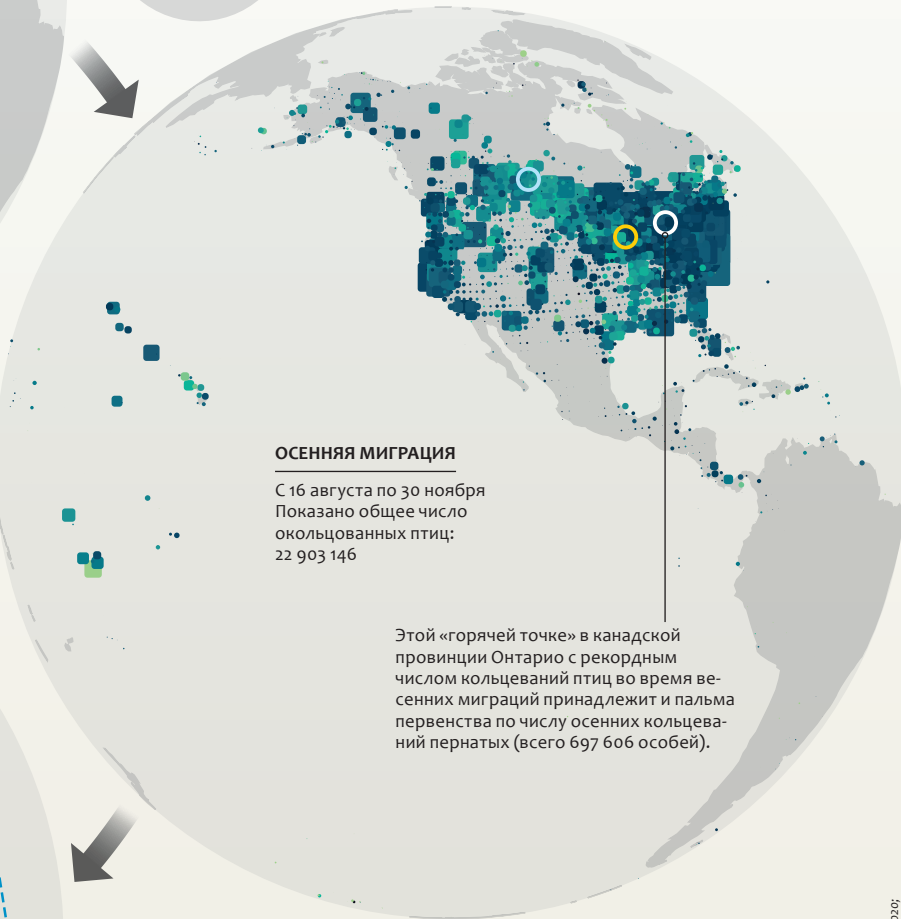
Темная крачка

Глупая крачка

Всего окольцована 364 841 птица шести видов.

«Горячая точка» размножения

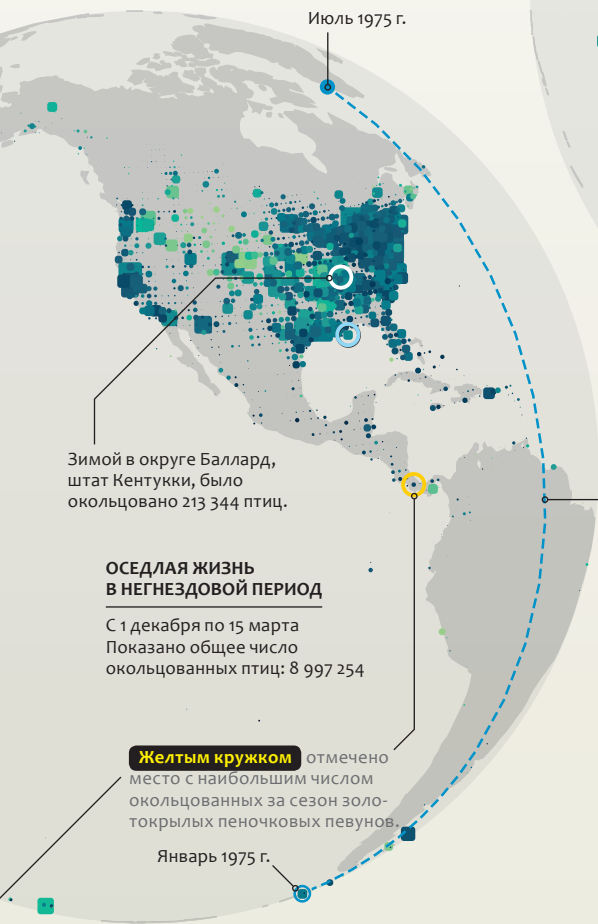
Начиная с 1960 г. в окрестностях национального парка Драй-Тортугас на островах Флорида-Кис в период гнездования с 16 мая по 15 августа в общей сложности была окольцована 364 841 птица. Большинство из этого количества пернатых составляли темные и обыкновенные глупые крачки — 348 366 и 86 999 особей соответственно.



ОСЕННЯЯ МИГРАЦИЯ

С 16 августа по 30 ноября
Показано общее число окольцованных птиц: 22 903 146

Этой «горячей точке» в канадской провинции Онтарио с рекордным числом кольцеваний птиц во время весенних миграций принадлежит и пальма первенства по числу осенних кольцеваний пернатых (всего 697 606 особей).



Июль 1975 г.

Зимой в округе Баллард, штат Кентукки, было окольцовано 213 344 птиц.

ОСЕДЛАЯ ЖИЗНЬ В НЕГНЕЗДОВОЙ ПЕРИОД

С 1 декабря по 15 марта
Показано общее число окольцованных птиц: 8 997 254

Желтым кружком отмечено место с наибольшим числом окольцованных за сезон золотокрылых пеночковых певунов.

Январь 1975 г.

Заядлый путешественник

Южнополярный поморник — одна из птиц, совершающих самые далекие перемещения между местами кольцевания и местами повторных встреч с наблюдателями. Так, поморник с номером кольца 877-34271 был окольцован 1 января 1975 г. на острове Шорткат в Антарктике, а через полгода убит на юго-западном побережье Гренландии на расстоянии примерно 14,5 тыс. км от места кольцевания. (Пунктирная линия показывает кратчайшее расстояние между местами кольцевания и гибели птицы и, скорее всего, не отражает истинного маршрута ее перемещения.)

быть оснащены и дополнительными маркерами — например, цветными кольцами или спутниковыми передатчиками. Полученные данные используются учеными всего света для отслеживания перемещений оседлых, кочующих и перелетных птиц.

Исследования, связанные с кольцеванием птиц, пролили свет на скрытую жизнь более чем 900 видов пернатых Северной Америки — от певчих птиц и хищников до обитателей пресных водоемов и морских просторов. Так, изучение сокола сапсана в прибрежном штате Вашингтон на северо-западе США показало, что этот грозный хищник и самое быстрое животное планеты не только охотится на живую добычу в воздухе, но и довольно часто кормится падалью на земле. А в ноябре 2020 г. ученые увидели, как на гавайском атолле Мидуэй самка темноспинного альбатроса по кличке Уиздом (Мудрость), впервые окольцованная в 1956 г., насиживает недавно отложенное яйцо; наблюдение показало, что морские птицы живут и размножаются гораздо дольше, чем считалось прежде.

Практика кольцевания всегда опиралась на орнитологов-любителей — от энтузиастов, прошедших основательную подготовку по отлову и кольцеванию пернатых, до добровольцев, сообщающих о результатах своих наблюдений за птицами

Во многих случаях сведения, полученные с помощью кольцевания, позволяли ученым выявлять виды и популяции птиц, находившиеся под угрозой исчезновения, и помогали им разрабатывать соответствующие стратегии по их спасению. Как отмечает заведующий Лабораторией кольцевания птиц Антонио Селис-Мурильо (Antonio Celis-Murillo), один из самых блистательных примеров этой работы — история американского журавля, эффективного эндемика Северной Америки ростом 1,5 м с белоснежным оперением. В 1940-х гг. данный вид находился на грани вымирания. В результате неконтролируемой охоты на птиц ради мяса и красивых перьев, а также уничтожения их природных болотистых местообитаний численность последней уцелевшей популяции птиц

сократилась до 16 особей. Сегодня, спустя пять десятилетий разведения в неволе и тщательного наблюдения за окольцованными птицами, уже существуют четыре популяции диких американских журавлей, а общая численность этих птиц превышает 660 особей. Вид все еще находится под угрозой исчезновения, но его будущее уже представляется вполне благополучным.

В последние годы, говорит Селис-Мурильо, ученые, использующие в своей работе данные по кольцеванию птиц, уделяют большое внимание спасению не только самих птиц, но и мест их обитания. Например, с помощью кольцевания пернатых орнитологи обнаружили ранее неизвестное крупное место зимовки атлантического подвида желтоного зуйка, маленькой прибрежной птички с оперением песочного цвета, бегающей вдоль кромки воды и питающейся червями и прочими беспозвоночными. Около трети всех представителей этого подвида зуйка, размножающегося на атлантическом побережье США, проводят зимние месяцы на кучке маленьких островков под названием Джоултер-Кейс в составе Багамского архипелага. Это открытие способствовало тому, что в 2015 г. указанный регион был объявлен охраняемым национальным парком.

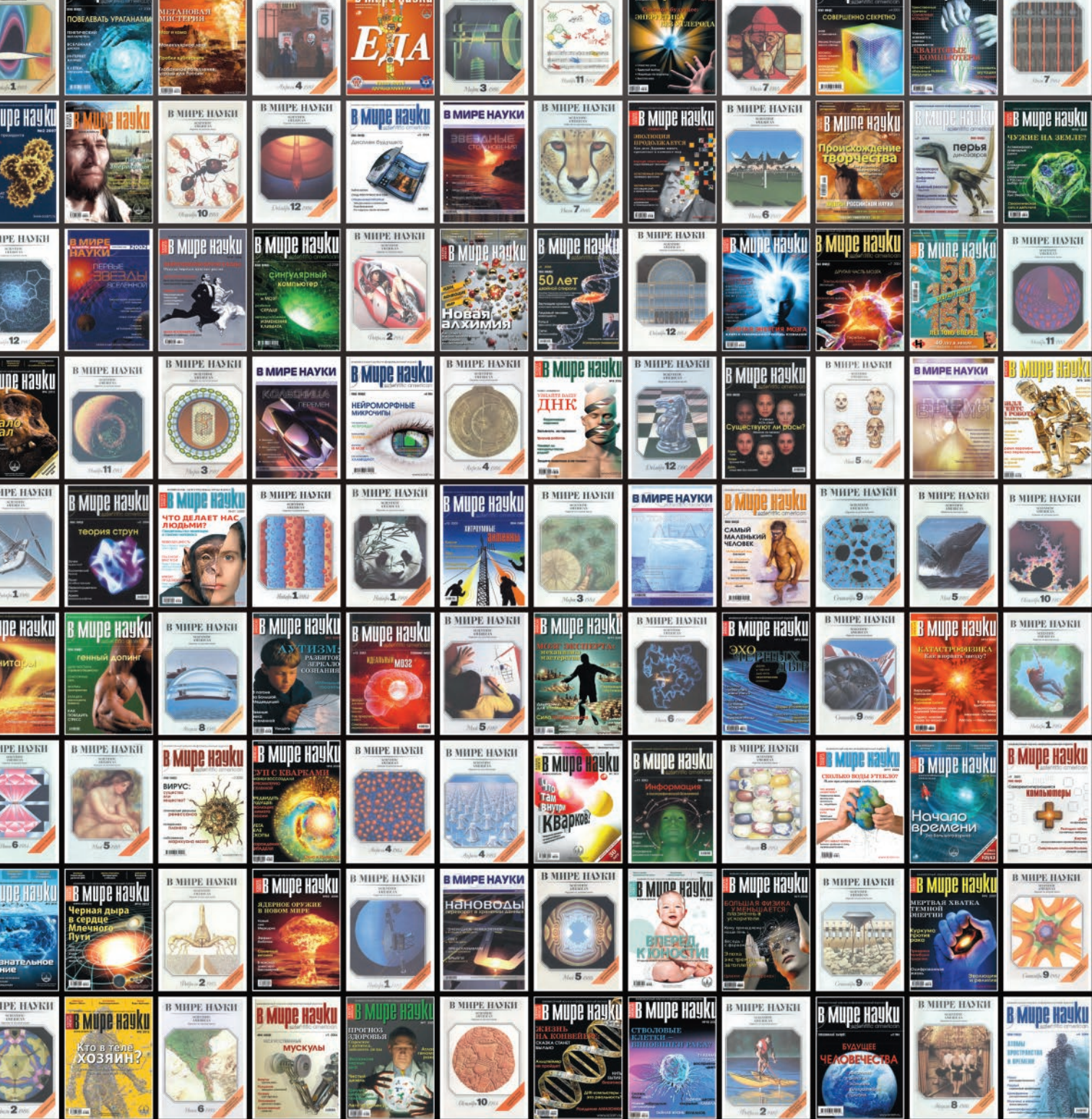
Практика кольцевания всегда опиралась на орнитологов-любителей — от энтузиастов, прошедших основательную подготовку по отлову и кольцеванию пернатых, до добровольцев, сообщающих о результатах своих наблюдений за птицами. По мнению биолога Дэнни Быстрака (Danny Bystrak) из Лаборатории кольцевания птиц, в большинстве случаев сообщения об окольцованных пернатых поступают от охотников на водоплавающую дичь. А одно из основных практических применений данных, полученных с помощью кольцевания, предусматривало разработку правил охоты, способствующих поддержанию устойчивых популяций пернатой дичи.

Но времена меняются. «Охота теряет популярность, зато все больше людей увлекаются наблюдением за птицами и их фотографированием», — говорит Селис-Мурильо. Для многих людей такое хобби сегодня — луч света в темном царстве пандемии коронавирусной инфекции. Ученый предсказывает, что в ближайшее время начнется настоящий бум наблюдений за пернатыми. И все фанаты этого хобби смогут сообщать о своих находках и наблюдениях в центры кольцевания птиц — их данные помогут ученым инициировать новые исследования птиц и изучение мест их обитания. ■

Перевод: А.В. Щеглов

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Вонг К. Как птицы расправили крылья // ВМН, № 3, 2021.



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







Illustrations by Terryl Whitlatch

ОБ АВТОРАХ

Террил Уитлэтч (Terryl Whitlatch) — иллюстратор, специализирующийся на изображении анатомии животных, палеонтологических реконструкциях и воссоздании мифологических существ. Участвовала в разработке персонажей «Звездных войн» и других фильмов.



Майкл Хабиб (Michael V. Habib) — палеонтолог и биомеханик из Лос-Анджелесского музея естественной истории. Изучает анатомию и локомоцию птерозавров, птиц и оперенных динозавров.



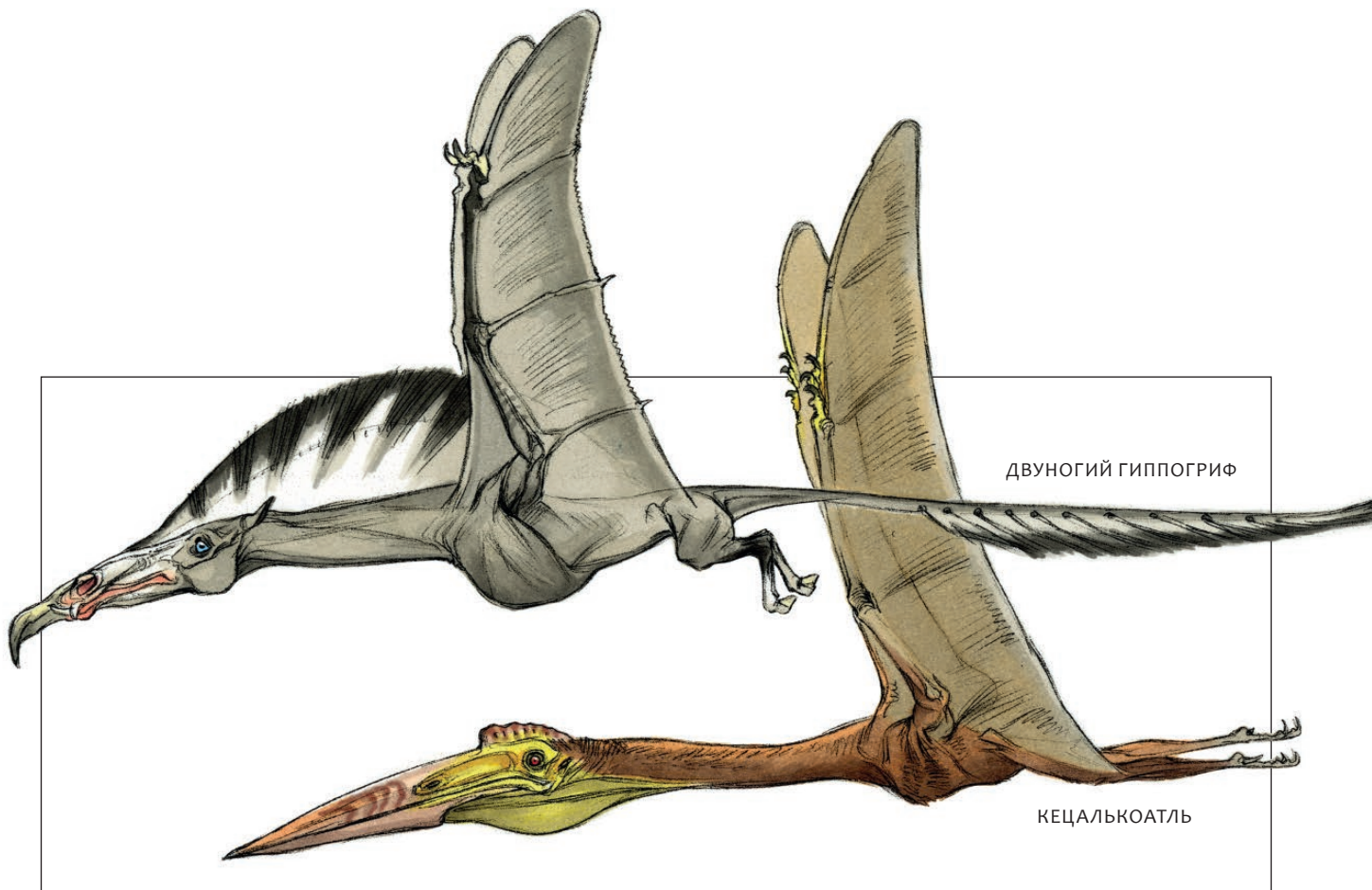
БИОМЕХАНИКА

Полеты фантазии

Палеонтолог и иллюстратор воссоздают мифических существ, строго следуя законам биомеханики

Террил Уитлэтч и Майкл Хабиб

Мифы и легенды разных культур мира изобилуют причудливыми фантастическими существами, принимающими самые необычные формы. Одни из них бегают или ползают по земле, другие плавают в воде, а третьи летают по воздуху. Один из авторов настоящей статьи (Майкл Хабиб) — палеонтолог, изучающий ископаемых птиц и птерозавров, другой (Террил Уитлэтч) — иллюстратор, выдумывающий необычных крылатых персонажей для книг и фильмов. Неудивительно поэтому, что биомеханика полета и способы правдоподобного изображения летающих животных представляют для нас особый интерес. Недавно мы решили объединить наши усилия и совместно создать книгу, посвященную этим вопросам, под названием «Крылатые чудовища: как изображать летающих позвоночных» (*Flying Monsters: Illustrating Flying Vertebrates*). Она должна выйти в свет в 2021 г., а ее героями станут как реальные, так и выдуманные персонажи. В этой статье мы расскажем о трех из них и объясним научные законы, благодаря которым они могут подниматься в воздух и опускаться на землю.



ДВУНОГИЙ ГИППОГРИФ

КЕЦАЛКОАТЛЬ

ПЕРЕОСМЫСЛЕНИЕ КЛАССИКИ: летающие лошади

Летающие кони встречаются в мифах и легендах на каждом шагу. Самый знаменитый из них — пожалуй, Пегас, крылатый конь древнегреческих мифов, который выпрыгнул из туловища змееволосого чудовища Медузы, когда легендарный герой Персей отрубил ей голову. Гораздо менее известен гиппогриф — наполовину конь, наполовину пернатый хищник (грифон), способный скакать по земной тверди наподобие лошади, а затем взлетать и парить в воздухе наподобие орла.

Мы слегка изменили классический образ гиппогрифа и превратили его в помесь лошади и птерозавра. Такое гибридное существо вполне могло бы подниматься в воздух, даже если бы оно не уступало размерами крупному коню. Кецалькоатль, криодракон, хацегоптерикс и прочие гигантские птерозавры достигали громадных размеров и сохраняли при этом способность к полету благодаря целому ряду факторов: их полые кости отличались большой легкостью, но высокой прочностью; крылья были образованы кожно-мышечной перепонкой, а не сравнительно тяжелыми перьями; во время взлета эти рептилии, по-видимому, отталкивались от земли не только задними конечностями, но и сложенными крыльями — это позволяло им совершать гораздо более мощный прыжок, чем при отталкивании от земли только ногами. Наш гиппогриф (а точнее — «гиппоптер») тоже может использовать крылья в качестве прыгательных конечностей для отрыва от земли.

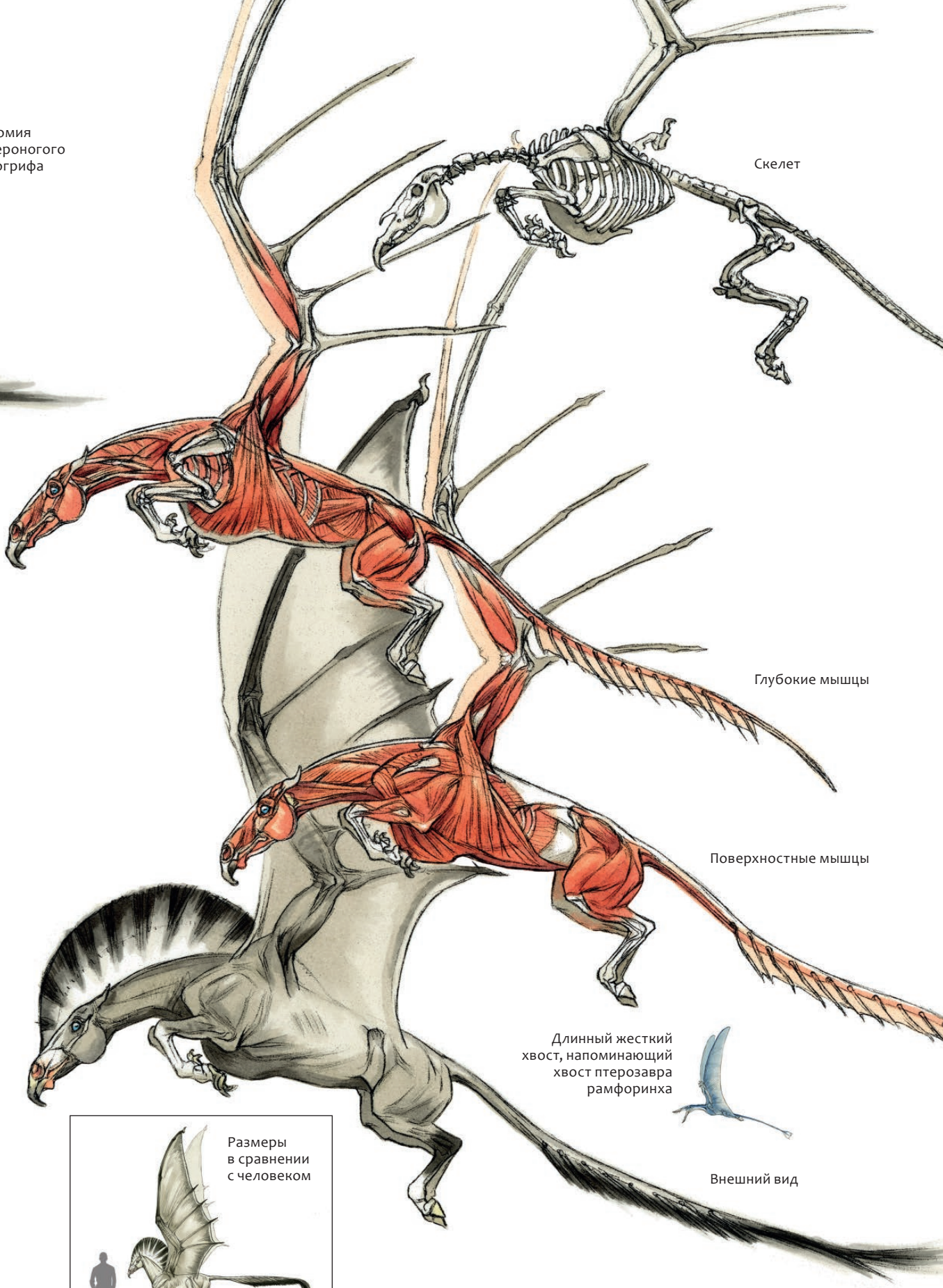
Такой стиль взлета вполне доступен как двуногому крылатому коню, у которого пара передних конечностей представлена крыльями, так и четвероногой лошади, у которой крылья представляют собой третью пару конечностей. В последнем случае существо во время взлета отталкивается от земли с помощью пары распростертых крыльев и четырех бегательных ног. Но эти две анатомические конфигурации гиппогрифа имеют существенную разницу: если крылатое четвероногое животное нуждается лишь в дополнительной паре «птичьих» лопаток, то двуногому гиппогрифу требуется полная «реконструкция» плечевого пояса, потому что

реальные лошади не могут разводить передние конечности в стороны и тем более поднимать их выше спины.

Самый реалистичный способ поднять в воздух фантастическое существо величиной с лошадь — это обеспечить контакт его крыльев с землей и заставить летательные мышцы выполнять двойную работу. Если учитывать физиологические характеристики мышц и прочность костей, типичные для позвоночных животных, а также особенности телосложения, характерного для животных типа птерозавров, можно думать, что вес тела, при котором такое существо будет сохранять способность к полету, не должен превышать 360 кг. Если бы кости летающих лошадей изобиловали воздушными полостями, как кости гигантских вымерших птерозавров или многих современных птиц, они вполне могли бы достигать размеров реальных лошадей и при этом весить менее 360 кг. А если бы эти существа были оснащены более крупными и сильными мышцами и более длинными прыгательными конечностями, чем гигантские древние птерозавры, их масса могла бы быть и больше. Надлежащая анатомия смогла бы обеспечить полет даже лошади весом около 540 кг.

У нашего гиппогрифа, как у современных летучих мышей и вымерших птерозавров, крылья поднимаются вверх за счет сокращения мышц спины, а опускаются вниз за счет сокращения грудной мускулатуры. У птиц же в отличие от этих существ мышцы груди отвечают и за поднятие, и за опускание крыльев. Если летательные мышцы расположены у гиппогрифа так же, как у летучих мышей или птерозавров, его грудная клетка может иметь вполне приемлемые размеры. Но если летательные мышцы будут размещаться как у птиц, грудная клетка этого существа станет очень громоздкой, а его движения — неуклюжими. Принципы анатомического строения, характерные для летучих мышей и птерозавров, представляются более реалистичными и для крылатых четвероногих гиппогрифов, у которых движения лопаток не смогло бы обеспечить «птичье» расположение мышц.

Анатомия
четвероногого
гиппогрифа



Скелет

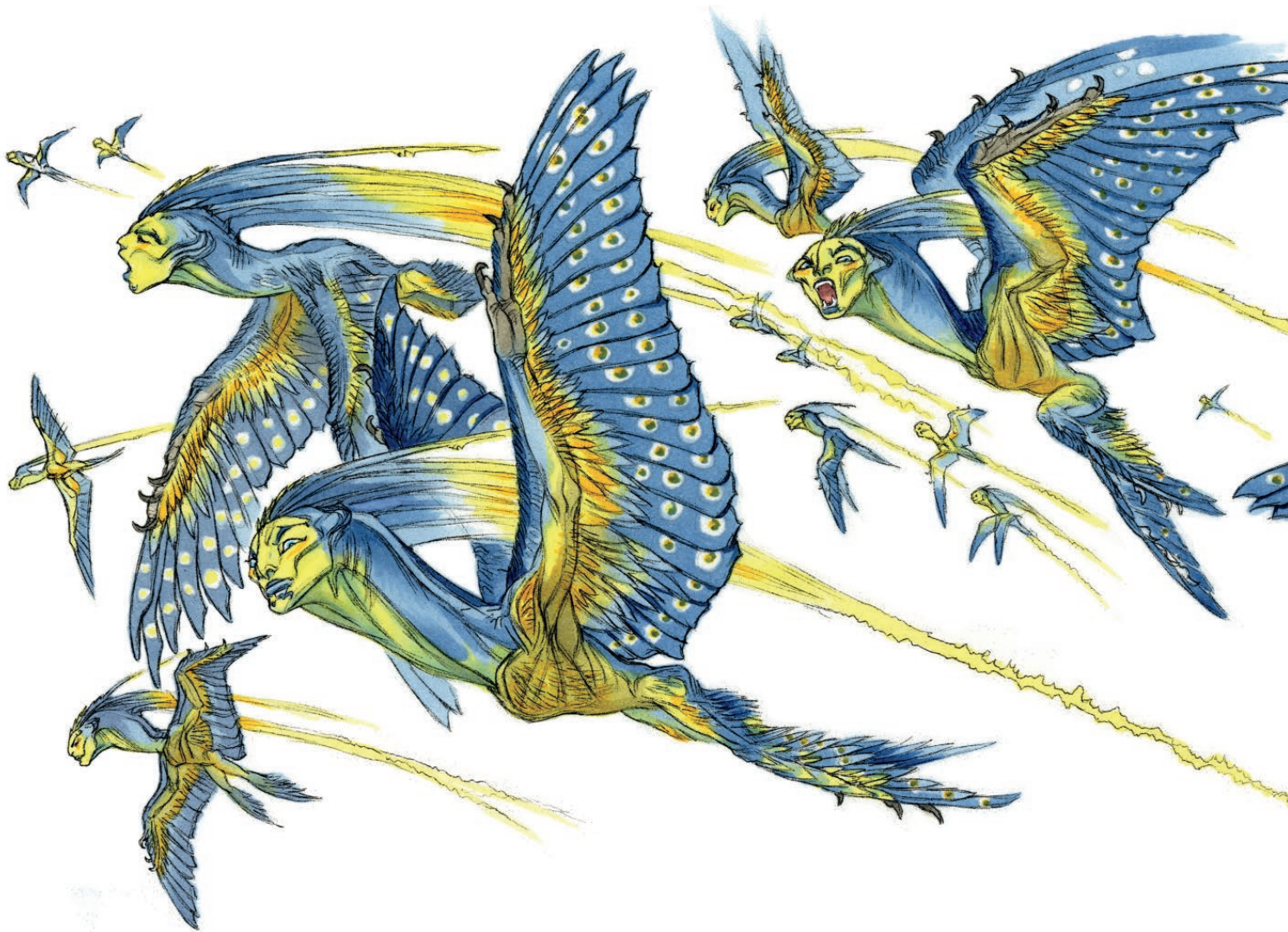
Глубокие мышцы

Поверхностные мышцы

Длинный жесткий
хвост, напоминающий
хвост птерозавра
рамфоринха

Внешний вид

Размеры
в сравнении
с человеком



МЕТАФИЗИЧЕСКАЯ ЖИВОПИСЬ: библейские ангелы

Несмотря на то что ангелы занимают центральное место в иудеохристианских преданиях, искусстве и традициях, детальные описания их внешнего облика в дошедших до нас религиозных текстах встречаются крайне редко. В современных источниках эти небожители нередко изображаются в виде крылатых людей, но скудные описания ангелов в Библии свидетельствуют о том, что они могут выглядеть и совершенно иначе: во многих случаях они описываются как существа, один взгляд на которых внушает человеку страх и ужас. Наиболее подробные описания ангелов содержат две книги Библии — книга пророка Иезекииля и Откровение Иоанна Богослова. В обеих книгах, похоже, описываются одни и те же четыре ангела, иногда называемые четырьмя живыми существами.

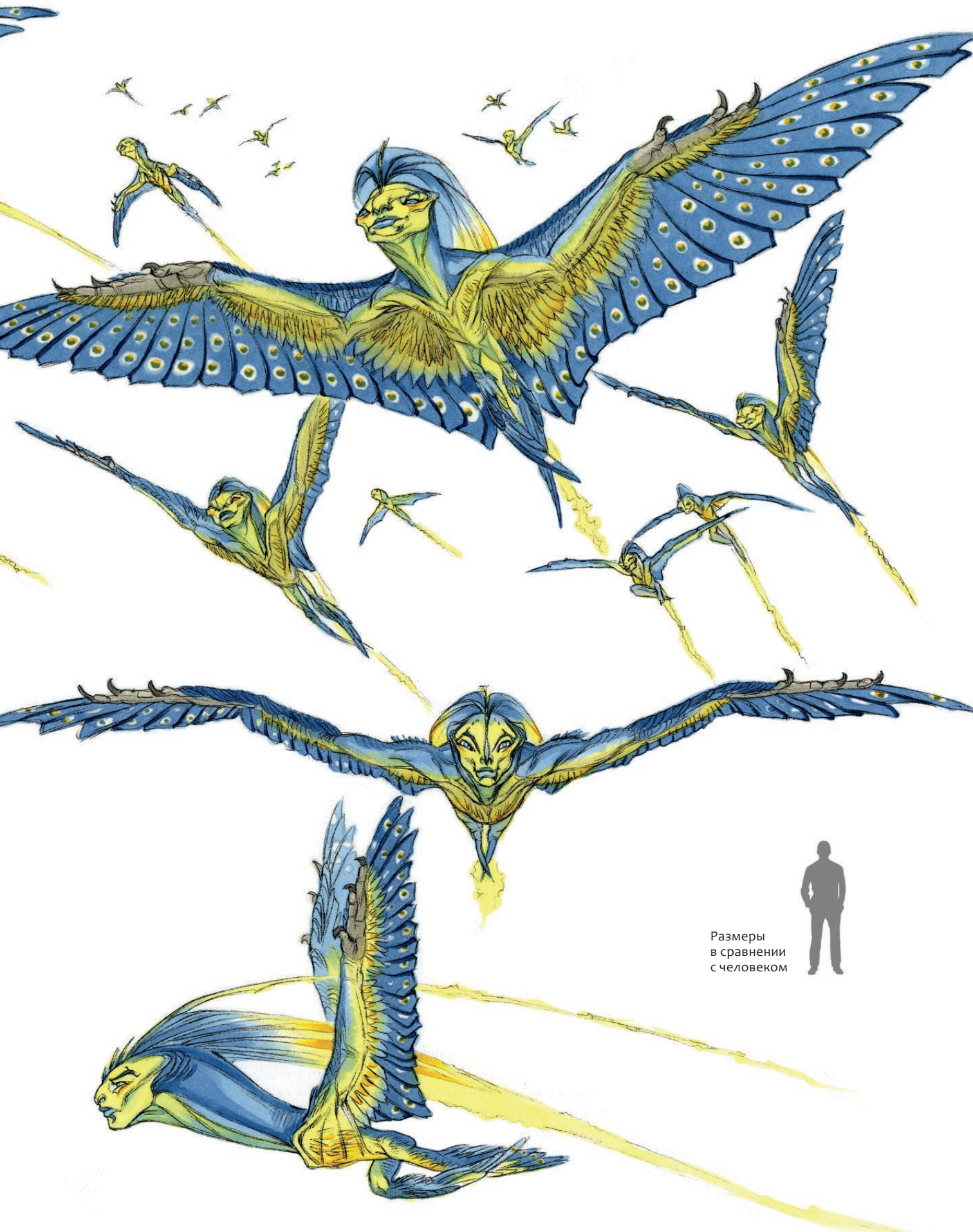
Описания, приводимые в этих двух религиозных текстах, совпадают в некоторых деталях, но в то же самое время сильно различаются по сути. В Откровении четыре могущественных ангела изображены в виде существ, похожих на льва, быка, человека и орла. Согласно же книге пророка Иезекииля, сходством с перечисленными существами обладают лишь лица ангелов. У Иоанна Богослова ангелы имеют по три пары крыльев, а у Иезекииля — по две пары крыльев, покрытых глазами. Шум их крыльев во время полета «подобен реву могучих вод», а когда они порхают вокруг Божьего престола, их окружают пламя и молнии.

Знаменитая ранняя интерпретация этих текстов, популяризованная христианским духовным писателем, епископом III в. и священномучеником Викторином Петавским, отождествляла четыре живых существа с четырьмя еванге-

листами: Марк ассоциировался с образом льва, Лука — с образом быка, Иоанн — орла, а Матфей — человека.

При изображении ангела, символизирующего Матфея, мы следуем в основном описанию, приведенному в книге Иезекииля. Чтобы летящая фигура воспринималась как можно более реалистично, мы обратились к окаменелостям вымерших существ. Некоторые черты мы позаимствовали у микрораптора — летающего динозавра с четырьмя крыльями. Как показали недавние исследования, микрораптор и его родственники, вероятно, летали за счет взмахов передних крыльев, а задние крылья при этом они удерживали под туловищем, используя их для сохранения равновесия и маневренности. Соответственно, и у нарисованной нами фигуры ангела передние крылья совершают регулярные взмахи, а задние опущены вертикально вниз.

Для воссоздания общих пропорций летящей фигуры небожителя мы обратились к крупнейшим летающим существам в истории планеты — гигантским птерозаврам-аждархидам. К группе этих крылатых рептилий относились кецалькоатль и криодракон — животные, чья масса достигала 200 кг, а размах крыльев — 10–11 м. Эти огромные птерозавры обладали массивной головой и мощными шейей, грудью и передними конечностями. Изображенная нами фигура летящего ангела также обладает массивной шейей, увенчанной человеческой головой. На широкой груди находятся сильные мышцы, а прямая стреловидность крыльев выравнивает центр подъемной силы с центром массы. Изображенная в результате фигура обладает, на наш взгляд, грозным и величественным обликом, а ее полет выглядит весьма реалистично.



Размеры
в сравнении
с человеком





БЕСКРЫЛЫЙ ПОЛЕТ: азиатские драконы

Реалистичность полета азиатских драконов (особенно персонажей китайской, вьетнамской и японской мифологии) вызывает сильные сомнения прежде всего в анатомическом плане — ведь эти существа абсолютно лишены крыльев. Их тело обычно имеет змеевидную форму, но, согласно традиционным представлениям, к змеям они не имеют никакого отношения. Напротив, драконов часто наделяют признаками млекопитающих и рыб и ассоциируют с такими стихиями и явлениями, как реки, дожди, молнии, бури и штормы.

Для того чтобы подыскать для своей работы приемлемые прототипы драконов из реального мира, мы обратились к бескрылым животным, способным к планирующему полету. К числу таких существ относятся, например, украшенные древесные змеи (род *Chrysopelea*), лишенные каких-либо конечностей и при этом преодолевающие по воздуху десятки метров. Во время скольжения в воздухе украшенные змеи сплющивают и характерным образом изгибают тело; изгибы сильно напоминают извилистые траектории полета летучих драконов, нередко изображаемые в традиционном китайском и японском искусстве. (Так, исполняя новогодний танец, группа китайских танцовщиц из девяти и более человек удерживает фигуру дракона на шестах и изгибает ее туловище из стороны в сторону.) Наш выбор украшенных древесных змей в качестве наиболее подходящей модели для воссоздания мифологических драконов был обусловлен еще и тем обстоятельством, что все виды этих рептилий обитают исключительно в Юго-Восточной Азии. Как и украшенные змеи, воссоздаваемый нами азиатский дракон начинает полет, уплощая туловище в воздухе и изгибая его в виде буквы S. Учитывая гигантские размеры мифологического дракона, для улучшения аэродинамических характеристик мы снабдили его небольшими конечностями и складками кожи по бокам туловища.

Создавая своего дракона, мы приглядывались и к другим необычным змеям из реального мира — например,

к мадагаскарским древесным ужам (род *Langaha*), которые помогли нам изобразить «усы», украшающие подбородок драконов в традиционном искусстве (с морды мадагаскарских змей также свисает длинный гибкий придаток). А благодаря азиатским плетевидным, или бронзовым, змеям (род *Ahaetulla*) мы наделили мифического дракона узкой мордой, горизонтальными зрачками и высокими гребнями над глазами.

Жизнь сказочного дракона ассоциируется с лесными реками и ручьями. Он может плавать, лазать по деревьям и скользить по земле, что делает его грозным хищником, легко адаптирующимся к самым разным условиям. Все змеи, информацию о которых мы использовали при создании этого персонажа, в природе охотятся на ящериц. Своих жертв они убивают ядом, впрыскиваемым в их тело ядовитыми зубами, которые сидят в задней части челюстей. По сути дела, ящерицы и змеи, обитающие во многих частях света, чаще всего становятся жертвами других ящериц и змей. Учитывая данный факт, мы предположили, что главную угрозу для детенышей западных драконов (то есть драконов с крыльями) представляли другие драконы — в частности, их змеевидные, лишенные крыльев сородичи с Востока. Таким образом, биологическая информация помогла нам воссоздать и многие экологические аспекты жизни нашего дракона. Знание тесной взаимозависимости между формами и функциями у реальных животных позволяет нам не только правдоподобно воссоздавать мифических существ, но даже строить гипотезы об их повадках и поведении. ■

Перевод: А.В. Щеглов

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Хабиб М. Исполины мезозойских небес // ВМН, № 12, 2019.



Шипы позади передних конечностей — рудименты крыльев, свидетельствующие о родстве с западными драконами

Расправленные ребра увеличивают площадь поверхности для создания подъемной силы

Детальное изображение головы азиатского дракона

Сравнительные размеры гиппогрифа, человека и западного дракона



ИЮНЬ 1971

Сословия у индюков. Мы провели подробное исследование популяции диких индюков, обитающих в штате Техас, в Заповеднике дикой природы Уэлдера и его окрестностях, и обнаружили поразительную степень социального расслоения, более высокую, чем наблюдается в любом другом сообществе позвоночных, кроме человека. Статус каждой особи у индюков определяется в течение первого года и обычно остается неизменным на протяжении всей жизни. Одним из последствий становится то, что большинство самцов никогда не получают возможности спариться. Предположительно, это явление приносит сообществу определенные выгоды, что дает пищу для размышлений. Возможно, индюки заповедника Уэлдера предлагают одну из моделей нравственной основы человеческого поведения, намекая, что часто люди могут получать выгоду, даже личную, уделяя меньше внимания удовлетворению собственных желаний и больше — групповой успешности.

Существуют зоны, в которых их появления можно ожидать почти при каждой грозе. По мере накопления данных о причинах и местах пожаров в национальных лесах эти молниеопасные зоны можно было бы отметить на картах и принять защитные меры, такие как противопожарные полосы, регулируемый выпас скота и очистка леса от мертвых деревьев, что более или менее автоматически контролировало бы распространение вызванных молниями пожаров.



ИЮНЬ 1921

Молния ударяет дважды. Старая как мир теория о том, что молния никогда не попадает в одно место дважды, была опровергнута лесничими Министерства сельского хозяйства США. Молнии очень часто ударяют почти в одни и те же точки.

Лунные бомбы. Отметины на поверхности Луны хорошо видны невооруженным глазом. Считалось, что впадины на лунной поверхности — свидетельство вулканической активности. Но недавно возникла конкурирующая гипотеза: подобные кратерам образования — следствие удара и разрушения поверхности метеоритами.

Доказательством стали результаты военных экспериментов, проведенных на полигоне в Лэнгли. Их цель — получение точных данных об эффекте сбрасываемых с аэропланов бомб. На фотографиях видны образованные взрывами бомб углубления, явно похожие на те, что обнаружены на Луне.



ИЮНЬ 1871

Черепашки и телеграф. Недавнее объявление управляющего Международной телеграфной компанией между городами Пунта-Роза и Ки-Уэст добавило новый пункт в список опасностей, которым могут подвергаться трансокеанские кабели. Указанный кабель за последний год часто повреждался или обрывался. Тщательное обследование показало, что повреждения следует отнести на счет головастых морских черепах, которые в этих водах изобилуют. Во многих местах кабель выглядел так, будто его прокусили; в других — сдавлен с двух сторон до такой степени, что сплюснулся до потери проводимости. Там, где происходили обрывы и повреждения, головастые черепахи водятся в наибольшем количестве. Компания отправила заказ на гораздо более толстый и прочный кабель.

Молодые старики. Людей, чьи умственные способности слабеют к 40–50 годам, легион. Их разум находится в немощном, истощенном состоянии и не способен справиться с серьезными насущными проблемами.



Старая «инфографика» показывает, как железные дороги США страдали из-за депрессивной экономики, характеризовавшейся спадом производства: «Железные дороги не могут перевозить несуществующие грузы», 1921 г.

Editor in Chief:	Laura Helmuth	Editors Emeriti:	Mariette DiChristina, John Rennie
Copy Director:	Maria-Christina Keller	Contributing Editors:	Gareth Cook, Lydia Denworth, Ferris Jabr, Anna Kuchment, Robin Lloyd, Melinda Wenner Moyer, George Musser, Ricki L. Rusting
Creative Director:	Michael Mrak	Art Contributors:	Edward Bell, Zoë Christie, Lawrence R. Gendron, Nick Higgins
Managing Editor:	Ricki L. Rusting	Art Director:	Jason Mischka
Chief Features Editor:	Seth Fletcher	Senior Graphics Editor:	Jen Christiansen
Chief News Editor:	Dean Visser	President:	Dean Sanderson
Chief Opinion Editor:	Michael D. Lemonick	Executive Vice President:	Michael Florek
Senior Editors:	Mark Fischetti, Josh Fischman, Clara Moskowitz, Madhusree Mukerjee, Jen Schwartz, Kate Wong	Vice President, Commercial:	Andrew Douglas
Associate Editors:	Gary Stix, Lee Billings, Sophie Bushwick, Andrea Thompson, Tanya Lewis, Sarah Lewin Frasier	Publisher and Vice President:	Jeremy A. Abbate
		© 2021 by Scientific American, Inc.	

В мире науки

SCIENTIFIC AMERICAN

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

Путешествие в Америку

Заселение американских континентов было гораздо более сложным процессом, чем считалось ранее, включающим изоляцию и слияние множества популяций на протяжении десятков тысяч лет.

Новая карта Вселенной

Каталог миллионов галактик за 11 млрд лет космической истории помогает ответить на некоторые из самых масштабных космологических вопросов.

Перспективный возраст

Более глубокое понимание функционирования мозга подростка может привести к улучшению образования и прогрессу в поддержании психического здоровья.

Искусство на меловой доске

Необычный фотопроjekt раскрывает очарование топологии, геометрии и математической теории.

Коктейли для кораллов

Способны ли пробиотики спасти коралловые рифы от вымирания?

Прорехи в щите

«Протечки» в защитном фильтре, называемом гематоэнцефалическим барьером, могут привести к нейродегенеративным заболеваниям. Обращение эффекта вспять вновь дарует стареющему мозгу молодость и здоровье.

Загадка «рукости» дельфинов

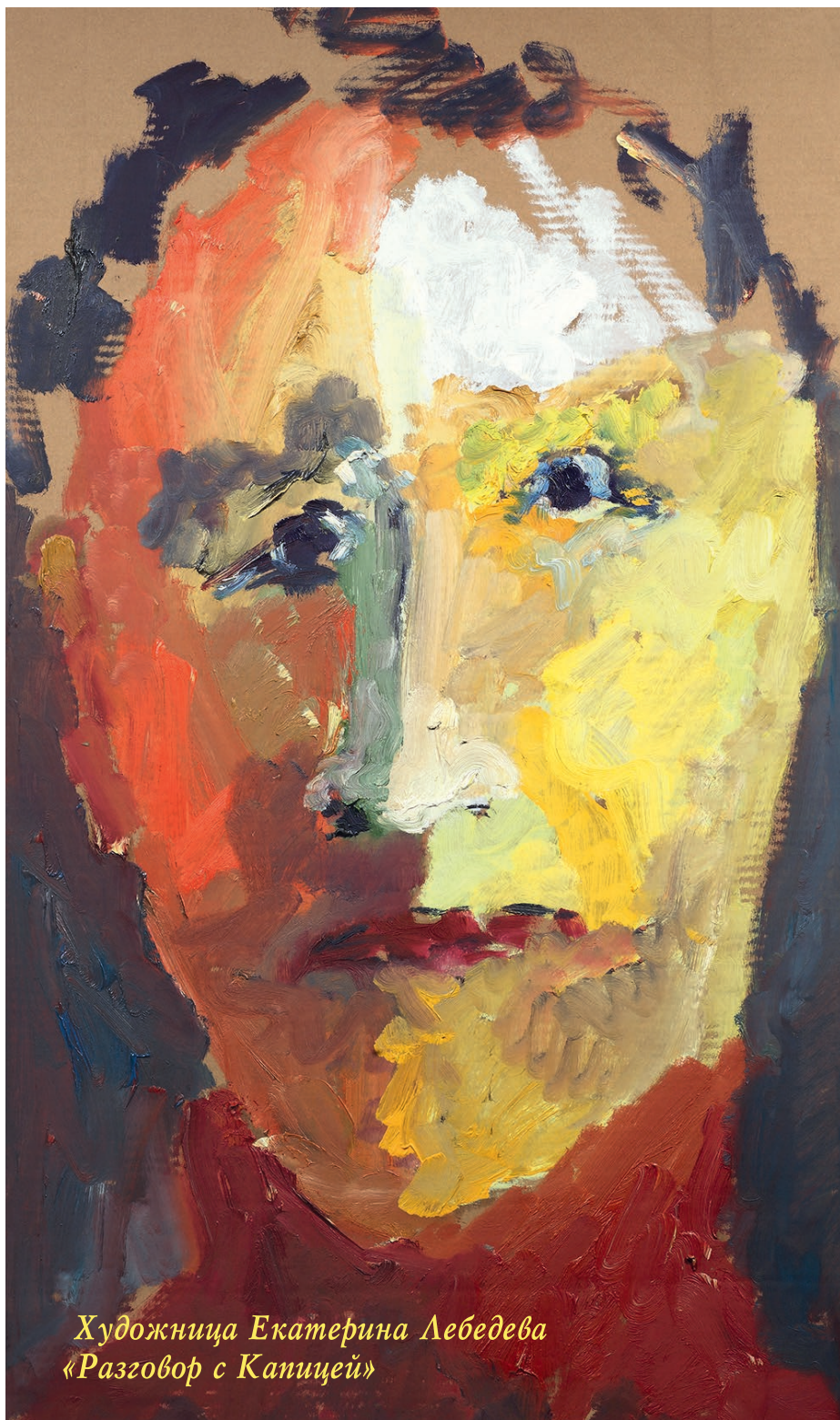
Исследования асимметричного поведения у дельфинов выявили необходимость нового взгляда на проблему латерализации.





ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛ

Научная Россия



*Художница Екатерина Лебедева
«Разговор с Капицей»*



Взгляд на науку с пристрастием

Актуальная информация
о науке и технике в России
и в мире

Открытия в разных
областях фундаментальной
и прикладной науки

Новости из научных
центров и вузов страны
и мира

scientificrussia.ru