

СУБАТОМНАЯ МИСТЕРИЯ
Зондируя самые глубокие уголки атома

ДНК КАК ЖЕСТКИЙ ДИСК?
Все знания человечества — в одном курином яйце

В мире науки

**SCIENTIFIC
AMERICAN**

Ежемесячный
научно-информационный
журнал

www.sci-ru.org

8/9 2019

12+

ЖИЗНЬ

Открывая природу
эволюционного
Большого взрыва

ПЛЮС

**«ПЛАНЕТА ОБЕЗЬЯН»
В АБХАЗИИ**

История российской приматологии

**ВАКЦИНЫ:
ПЕРЕОСМЫСЛЕНИЕ**

Может ли одна прививка защитить
от многих заболеваний?





24



68

Темы номера

ЭВОЛЮЦИЯ

Эволюционный дебют животных 4

Рэйчел Вуд

Последние ископаемые находки и анализ химии древних океанов показывают, что природа нашей планеты готовилась к кембрийскому взрыву много миллионов лет

НЕЙРОБИОЛОГИЯ

Как материя становится сознанием 14

Даниэль Бассетт и Макс Бертолеро

Благодаря новому подходу к изучению биологических нейросетей можно увидеть, как при взаимодействии разных частей мозга возникает психическая деятельность

ПРИМАТОЛОГИЯ

Обезьяна — это модель человека 24

Наталья Веденеева

В селе Веселом, недалеко от курортного Адлера, без малого 30 лет существует НИИ медицинской приматологии — «Планета обезьян», как его в шутку называют посетители



НЕЙРОБИОЛОГИЯ

Как животные принимают решения 36

Елена Кокурина

Принимать решения приходится не только человеку, но и любому животному. Свидетельствует ли это о наличии сознания?



СОДЕРЖАНИЕ

Август/сентябрь 2019

ФИЗИКА

Волна науки сносит барьеры 46

Виктор Фридман

В начале июля состоялась VII международная конференция «Рубежи нелинейной физики», организованная Институтом прикладной физики РАН



МУЗЕЕВЕДЕНИЕ

«Мы здесь спасаем красоту, а красота спасает нас» 60

Валерий Чумаков

Государственный историко-архитектурный и этнографический музей-заповедник Кижского острова — жемчужина Русского Севера



НАУКА И ОБЩЕСТВО

Иностраный член РАН Герман Парцингер: «Границ не существует!» 68

Константин Кудряшов

Создатель Евразийского отделения Германского археологического института — о том, чему можно поучиться политике у науки, и не только



136



98



88

ОБРАЗОВАНИЕ

В науку — со школьной скамьи

Наталья Лескова

Восточная мудрость гласит: хочешь иметь хорошего преемника — стань хорошим наставником. Этой истины придерживается руководство НИЦ «Курчатовский институт»

ЦИФРОВАЯ МЕДИЦИНА

Поверить алгеброй гармонию здоровья

Валерий Чумаков

Создатель цифровой диагностической системы «Виктория» **Виктор Литувев** уверен, что любая болезнь излечима, только для победы над ней надо бороться не с последствиями, а с причинами

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Глубочайшие тайники атома

Абхай Дешпанде и Рикутаро Есида

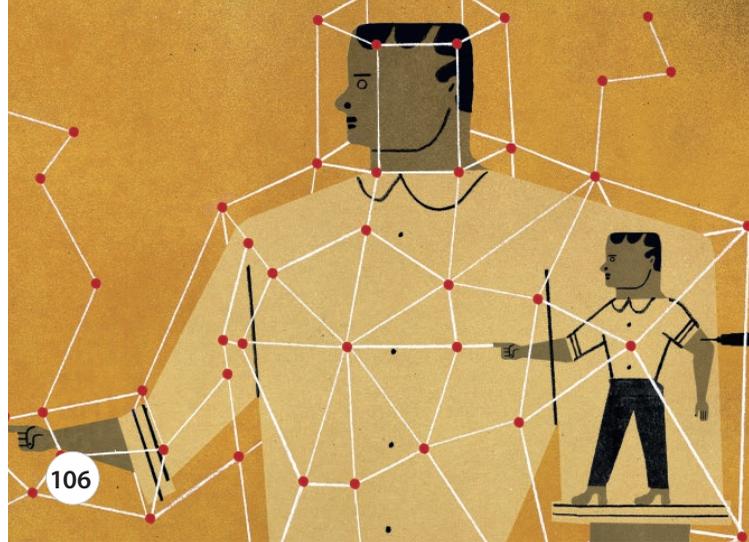
Откуда протоны и нейтроны берут массу и спин? Удивительно, но мы не знаем. Новая установка обещает найти ответы

ЭТОЛОГИЯ

Сон в одном глазу

Джан Гастоне Машетти

Почему у дельфинов, тюленей и других животных появилась способность спать так, чтобы половина мозга при этом бодрствовала



106

ИММУНОЛОГИЯ

74 Другой взгляд на вакцины

106

Мелинда Уэннер Мойер

Правильно организованная иммунизация может защитить организм сразу от нескольких заболеваний, а не только от того, против которого вакцина была разработана



БИОТЕХНОЛОГИИ

Все данные мира в одном яйце

116

Джеймс Далман

82

Как можно использовать молекулу ДНК для хранения и генерирования гигантских объемов информации

БИОЛОГИЯ

Неуязвимые клетки

126

Роуэн Джейкобсен



Биологи близки к созданию организма, способного противостоять любому существующему на Земле вирусу. На очереди могут быть неуязвимые клетки человека

СПЕЦИАЛЬНЫЙ РЕПОРТАЖ: ЮБИЛЕЙ

Один маленький шаг назад во времени

136

Полвека спустя после «Аполлона-11» мы вспоминаем, как достигли невозможного и почему мы должны переделать это снова

98

Разделы

От редакции

3

50, 100, 150 лет тому назад

125, 176



4



126

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Наши партнеры:



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



РОСАТОМ



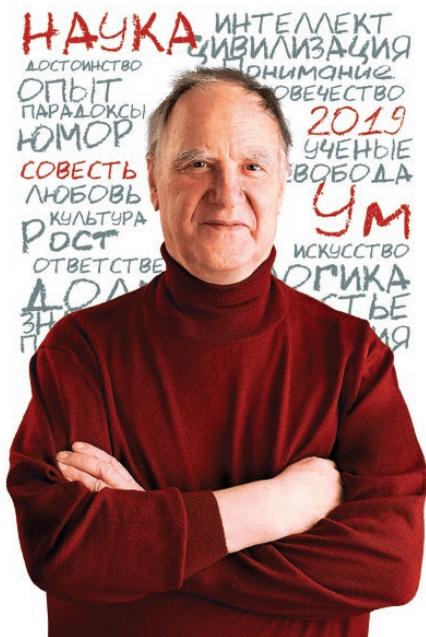
Сибирское отделение РАН



очевидное
невероятное



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



Учредитель и издатель:

Некоммерческое партнерство «Международное партнерство
распространения научных знаний»

Главный редактор:

В.Е. Фортов

Главный научный консультант:

президент РАН акад. А.М. Сергеев

Ответственный секретарь:

О.Л. Беленицкая

Зав. отделом иностранных материалов:

А.Ю. Мостинская

Шеф-редактор иностранных материалов:

В.Д. Ардаматская

Зав. отделом российских материалов:

О.Л. Беленицкая

Выпускающий редактор:

М.А. Янушкевич

Обозреватели:

В.С. Губарев, В.Ю. Чумаков

Администратор редакции:

О.М. Горлова

Научные консультанты:

член-корр. РАН П.М. Балабан; член-корр. РАН О.Н. Бахмет; член-корр. РАН А.Н. Богатырев;
акад. Б.А. Лапин; д.э.н. В.Н. Литуев; член-корр. РАН С.В. Орлов; иностранный член РАН
Г. Парцингер; к.ф.-м.-н. В.Г. Сурдин; д. ф.-м.-н. П.А. Форш

Над номером работали:

М.С. Багоцкая, Н.В. Веденева, Е.В. Кокурина, К.В. Кудряшов, А.П. Кузнецов, С.М. Левензон,
Н.Л. Лескова, И.В. Ногаев, А.И. Прокопенко, В.П. Фридман, Н.Н. Шафрановская, А.В. Щеглов

Дизайнер:

Д.А. Гранков

Верстка:

А.Р. Гукасян

Корректур:

Я.Т. Лебедева

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

В.Е. Фортов

Директор НП «Международное партнерство распространения научных знаний»:

В.К. Рыбникова

Финансовый директор:

Л.И. Гапоненко

Главный бухгалтер:

Ю.В. Калинкина

Адрес редакции:

Москва, ул. Ленинские горы, 1, к. 46, офис 138;
тел./факс: 8 (495) 939-42-66; e-mail: info@sciam.ru; www.sciam.ru
Иллюстрации предоставлены Scientific American, Inc.



Отпечатано:

ОАО «Можайский полиграфический комбинат», 143200, г. Можайск, ул. Мира, 93,
www.oaompk.ru, www.oaompk.pf, тел.: 8 (495) 745-84-28, 8 (4963) 82-06-85
Заказ № 0464

© 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.



Мариэтт Ди Кристина,
главный редактор журнала
Scientific American

Понимание **сквозь** время

«Я долго думала, что подарить мужу на 20-летие нашей свадьбы, — пишет в редакционной статье главный редактор *Scientific American* Мариэтт Ди Кристина. — Сначала я решила, что это будет фарфоровый сервиз, но потом неожиданно остановилась на окаменевшем трилобите, жившем в Китае 380 млн лет назад. Муж пришел в восторг; мы размышляли о символичности долгого путешествия этого членистоногого по Земле».

Недавние открытия в Сибири и Намибии показывают, что сложные формы жизни, такие как трилобиты, появились за миллионы лет до кембрийского периода. Автор статьи «Эволюционный дебют животных» пишет, что новые геохимические методы помогают понять, почему ископаемые кембрия появились именно в то время. Это важно для более глубокого понимания тех далеких эпох.

Сегодня мы живем в мире сетей, отмечают авторы статьи «Как материя становится сознанием». Это система федеральных автомагистралей, Всемирная паутина, сеть линий электропередач и т.п. Наш внутренний мир тоже объединен в сети, особенно мыслительные процессы. Ученые, исследующие такие сети, возможно, приведут нас к более четкому пониманию механизма

функционирования мозга, лучшей диагностике психических заболеваний и новым терапевтическим методам.

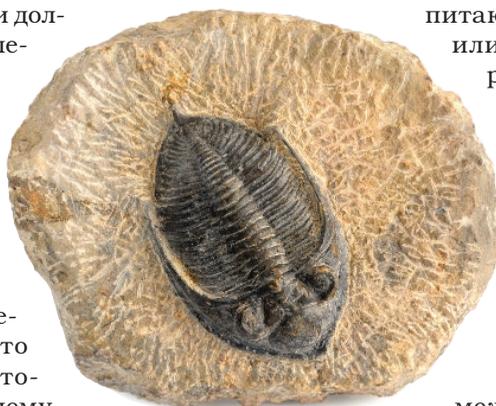
Однозначного ответа на вопрос, что такое сознание, нет. Тем более на него трудно ответить применительно к животным. Специалисты утверждают, что практически всем животным — и беспозвоночным, и млекопитающим — приходится на том

или ином уровне принимать решения. Означает ли это, что они наделены интеллектом? На этот и многие другие вопросы отвечает в своем интервью член-корреспондент РАН П.М. Балабан. Материал под названием «Как животные принимают решения» читайте в этом номере.

Насколько велико сходство между организмом человека и животного? В 20-е гг. прошлого

века ученые начали изучать различные заболевания в Сухумском питомнике обезьян, так как эти животные имеют сходные с человеком анатомические и физиологические характеристики. Об уникальной научной школе рассказывают руководители НИИ МП РАН в материале «Обезьяна — это модель человека». ■

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



Эволюционный ДЕБЮТ ЖИВОТНЫХ

Новые ископаемые находки и анализ химии древних океанов показывают, что природа нашей планеты готовилась к кембрийскому взрыву
МНОГО МИЛЛИОНОВ ЛЕТ

Рэйчел Вуд

ОБ АВТОРЕ

Рэйчел Вуд (Rachel A. Wood) — палеонтолог и геолог из Эдинбургского университета. Исследует происхождение и палеоэкологию морских рифов и эволюцию химии морской воды.



Ч

еловек, стоящий на высоком скалистом берегу одной из великих сибирских рек, попирает ногами величайший памятник в истории нашей планеты — древнюю геологическую границу между докембрием и кембрийским периодом возрастом 541 млн лет. Горные породы, покоящиеся ниже этой линии, содержат скудные ископаемые останки древнейших животных — едва различимые отпечатки мягкотелых существ и плохо сохранившиеся окаменелости, похожие на ракушки. Но породы, залегающие выше этой границы, буквально кишат причудливыми панцирями и раковинами. Еще немного выше начинают попадаться трилобиты и другие знакомые ископаемые существа. Останки всех этих организмов заставляют ученых изменить свои представления об истории кембрийского взрыва — одного из важнейших событий в развитии жизни на Земле.

Долгие десятилетия ученые считали, что сложно устроенные животные — многоклеточные организмы с дифференцированными тканями — возникли в результате так называемого кембрийского взрыва, когда за сравнительно короткий отрезок времени на Земле резко увеличилось разнообразие форм жизни, среди которых были и прародители многих современных групп животных. Однако, как свидетельствуют недавние открытия, сделанные в Сибири, Намибии и других

регионах планеты, многоклеточные животные на самом деле начали появляться на Земле за много миллионов лет до кембрийского взрыва — в последнем периоде докембрия, получивший название «эдиакарий», или «эдиакарский период». Среди находок — старейшие из известных науке существ с наружным или внутренним скелетами, которые состояли из минерализованной ткани и представляли собой ключевую эволюционную инновацию, присутствующую и многим современным животным.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Долгое время ученые полагали, что сложно устроенные животные возникли в результате кембрийского взрыва.
- Но все больше ископаемых находок свидетельствуют о том, что на самом деле эти существа «дебютировали» на много миллионов лет раньше — еще в так называемом эдиакарском периоде.
- Новейшие методы реконструкции химии древней морской воды позволяют лучше понять, какие факторы окружающей среды направляли раннюю эволюционную диверсификацию животных.

Существование таких животных в столь отдаленное время (550 млн лет назад) указывает на то, что экологические факторы, которые, как считалось прежде, управляли кембрийским взрывом, на самом деле вступили в игру гораздо раньше. Если выяснить, каким образом они направляли эволюцию древнейших многоклеточных животных в эдиакарском периоде, можно понять и механизмы последовавшего затем фантастического кембрийского роста биоразнообразия.

Палеонтологи активно исследуют кембрийские окаменелости уже более 150 лет. В результате сравнительно хорошо изучены временные и пространственные паттерны их появления на планете: сходные окаменелости появлялись на многих континентах примерно в одно и то же время и довольно синхронно подвергались сходным эволюционным изменениям. Но лишь сегодня, после обнаружения древних эдиакарских окаменелостей, мы начинаем постигать глубинные причины кембрийского взрыва.

Благодаря разработке новейших геохимических методов, перевернувших наши представления о постоянно меняющейся химии эдиакарско-кембрийских океанов, мы начинаем также понимать, почему кембрийский взрыв произошел именно 540–550 млн лет назад. Лишь недавно ученые смогли сопоставить результаты анализа найденных окаменелостей с геохимическими данными и получить ясное представление о взаимодействии в этот отрезок времени различных оболочек планеты — биосферы, геосферы, гидросферы и атмосферы. Мы уже в состоянии воссоздать фантастическую панораму морского дна и представить себе, как за десятки миллионов лет до кембрийского взрыва его мало-помалу начали заселять все более сложно устроенные существа — далекие прародители тех форм животной жизни, которые окружают нас сегодня.

Первые животные

Древнейшие свидетельства существования животных представляют собой не хорошо всем знакомые, легко узнаваемые окаменелости, а так называемые биомаркеры — сложные органические соединения, некогда входившие в состав живых существ или следов их жизнедеятельности. Один из них, стеран, ученые обнаружили в хорошо сохранившихся осадочных породах горного массива Хукф в Омане



Искапаемый след: важнейшие находки окаменелостей сложно устроенных животных были сделаны в эдиакарских породах по берегам сибирской реки Юдомы (1) и на периферии пустыни Намиб в Намибии (2)

возрастом по меньшей мере 650 млн лет. По мнению некоторых палеонтологов, найденная форма стерана уникальна для определенной группы губок и присутствие данных молекул в горах Хукф указывает на существование здесь этих животных в те далекие времена. Однако утверждением о наличии специфической связи между стеранами и конкретной группой губок согласны далеко не все ученые. Так, в сообщении, опубликованном в апреле 2019 г., указывается, что эти соединения характерны и для одной из групп одноклеточных организмов — амёб.

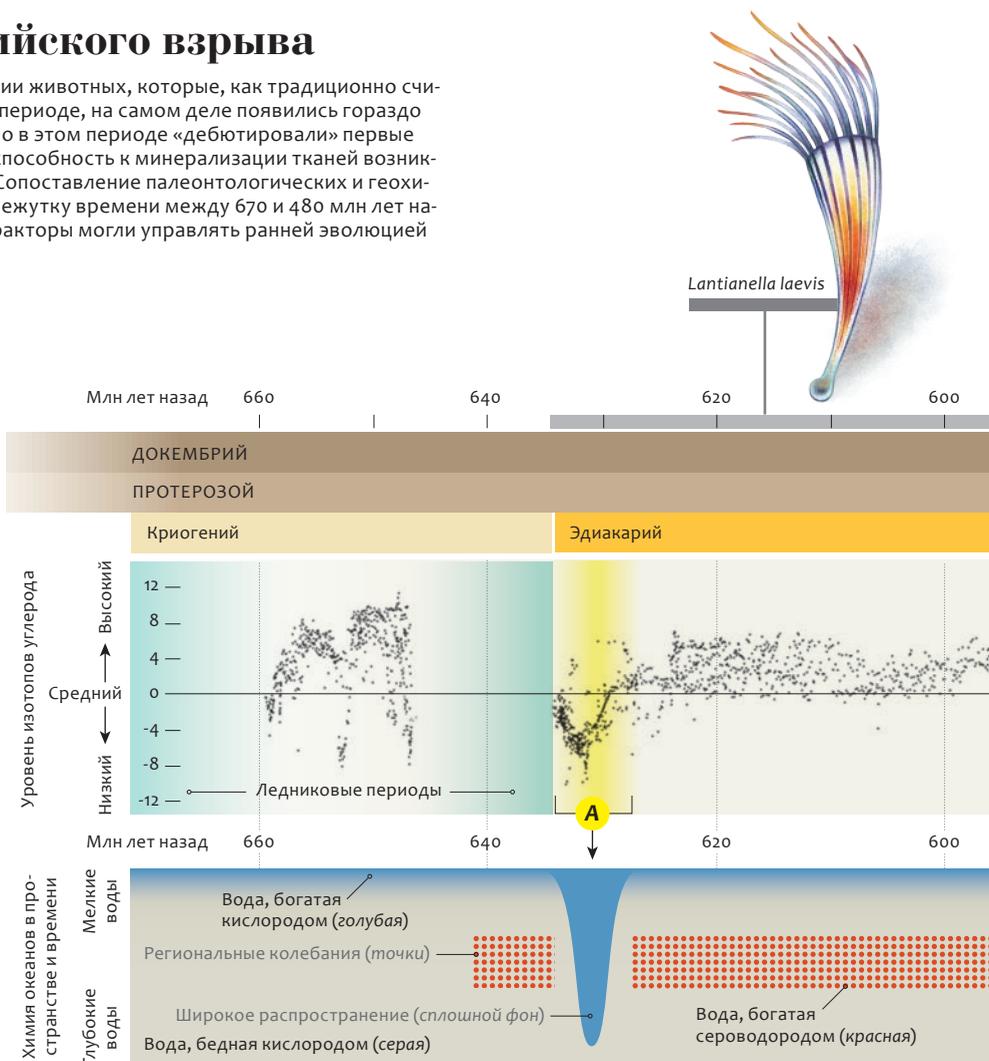
Горячие споры вызывают и ископаемые останки существ, найденные в осадочных

Задолго до кембрийского взрыва

Многие ключевые инновации в эволюции животных, которые, как традиционно считали ученые, возникли в кембрийском периоде, на самом деле появились гораздо раньше — еще в эдиакарии. Так, именно в этом периоде «дебютировали» первые животные со скелетом. Возможно, их способность к минерализации тканей возникла как средство защиты от хищников. Сопоставление палеонтологических и геохимических данных, относящихся к промежутку времени между 670 и 480 млн лет назад, указывает на то, какие средовые факторы могли управлять ранней эволюцией животных.

Геохимические свидетельства

Для дыхания животным нужен кислород. Эволюционная диверсификация животных в эдиакарии происходила в условиях значительного колебания уровня кислорода в океанах. Содержание изотопов углерода в эдиакарских породах указывает на то, что углеродный цикл на планете был очень нестабильным. Между тем, как показывает анализ соединений железа в этих породах, уровень растворенного в океанах кислорода, вероятно, достиг в эдиакарии некоего порога, который, несмотря на непрерывно возрастающую активность животных, обеспечивал удовлетворение всех их метаболических потребностей. Это обстоятельство и дало животным возможность резко увеличить свое разнообразие. Сегодня ученые полагают, что насыщение морей планеты кислородом представляло собой не медленный постепенный процесс, а произошло в результате серии эпизодов (A, B, C и D), которые, похоже, совпадают по времени с изменением содержания углеродных изотопов. Такая тенденция сохранялась на протяжении всего эдиакария, а возможно, и гораздо дольше.

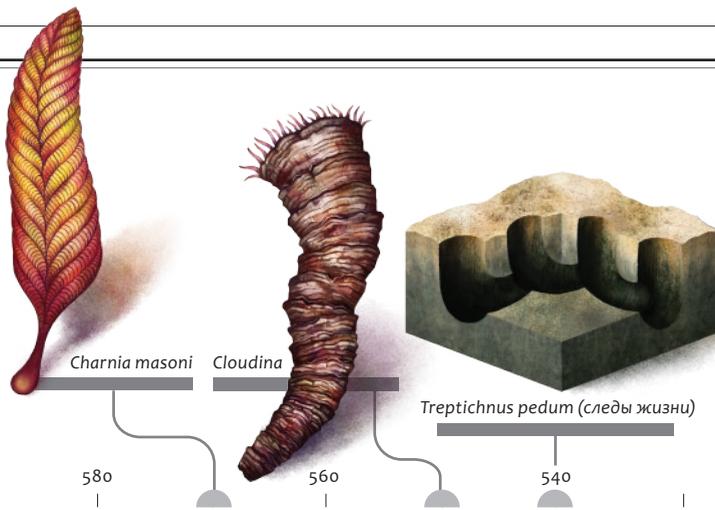


породах Ланьяньской геологической формации в Китае возрастом 635 млн лет и претендующие на звание древнейших из известных науке сохранившихся останков животных. Некоторые ученые считают, что эти крошечные мягкотелые существа, обладавшие щупальцевидными придатками, были близкими родичами кораллов и медуз. Но, по мнению других исследователей, плохая сохранность не позволяет говорить даже об их принадлежности к какому-либо виду животных.

Таким образом, в качестве древнейших ископаемых останков животных почти все палеонтологи признают окаменелости с острова Ньюфаундленд возрастом около 571 млн лет, образовавшиеся вскоре после завершения грандиозного оледенения планеты, когда она сплошь покрылась льдом (так называемая эпоха «Земли-снежка»).

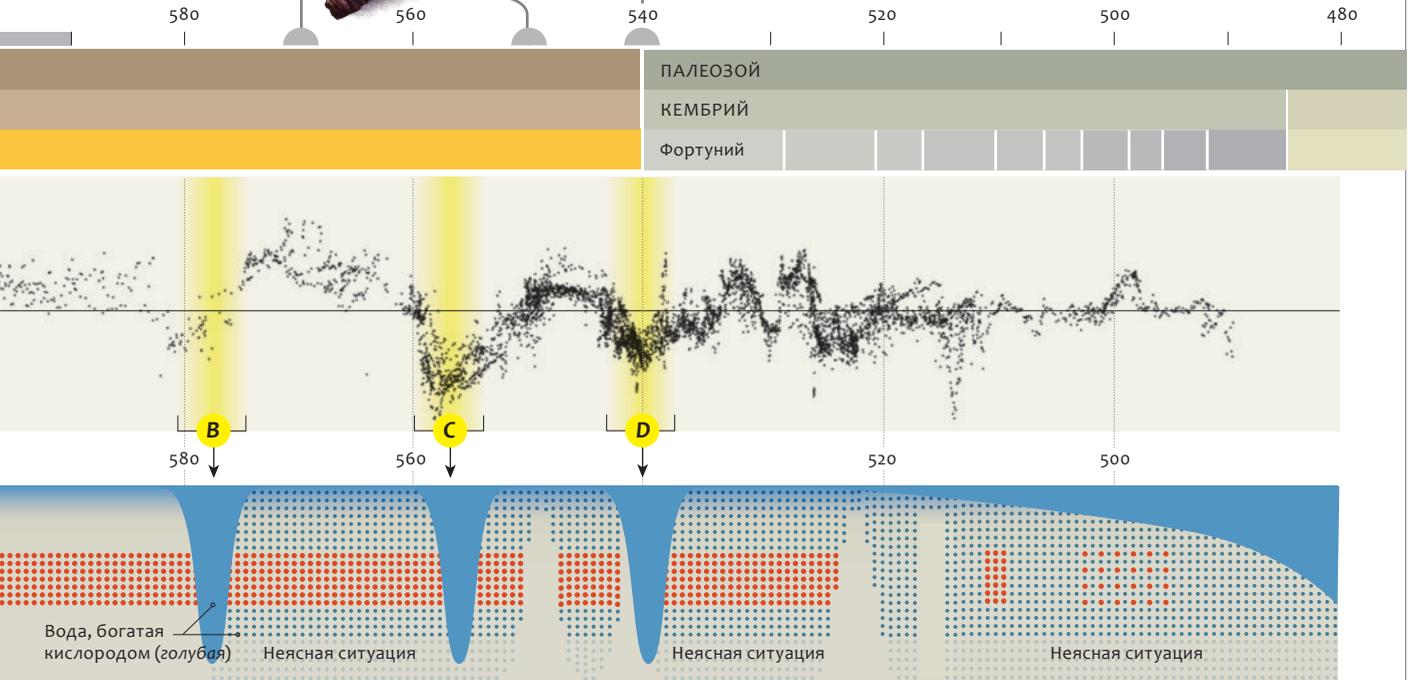
Среди ранних представителей эдиакарской биоты преобладали мягкотелые существа высотой или диаметром до 1 м. Некоторые из них напоминали крупные перистые листья папоротников, прикрепленные к морскому дну с помощью длинных вертикальных стеблей, а другие представляли собой распластанные на дне плоскотелые существа овальной формы, состоявшие из многочисленных симметрично расположенных сегментов. Такое строение увеличивало площадь поверхности тела, а это значит, что, возможно, все эти животные поглощали питательные вещества прямо из окружающей их воды.

Скучное разнообразие жизни сохранялось на Земле более 10 млн лет. Но затем темпы эволюции животных начали быстро расти. Ископаемые находки указывают на то, что примерно 560 млн лет назад



Ископаемые свидетельства

К числу поразительно сложно устроенных эдиакарских животных относились *Lantianella laevis*, возможный предок современных медуз; *Charnia masoni*, которая, вероятно, прикреплялась к морскому дну и поглощала питательные вещества из воды; клаудина (*Cloudina*), одно из древнейших животных, обладавших скелетом; и *Treptichnus pedum*, загадочное существо, известное лишь по ископаемым следам жизнедеятельности в виде нор в морском дне.

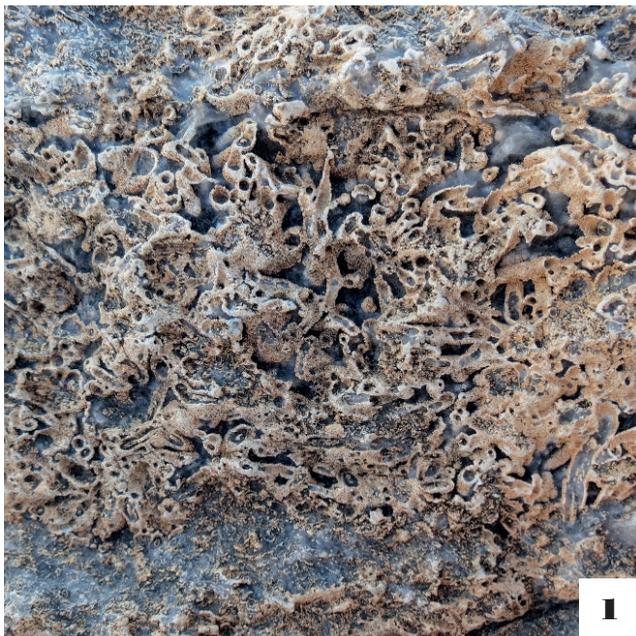


эдиакарская биота стала гораздо более разнообразной и уже включала подвижных животных, населявших мелководные моря планеты. На некоторых окаменелостях сохранились царапины, возникшие, возможно, в результате соскабливания животными водорослей. Примерно в это же время животные начинают и сооружать первые примитивные норы — еще одно подтверждение того, что они научились активно передвигаться и рыться в слое осадков на морском дне.

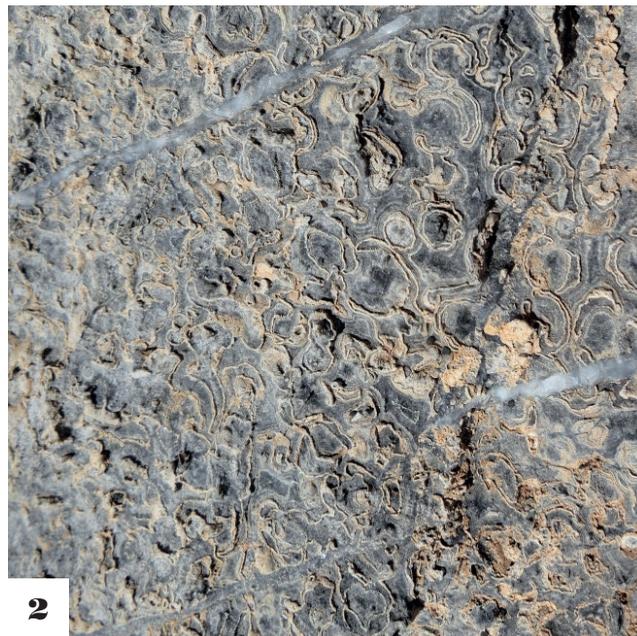
Перенесемся примерно на 550 млн лет назад, когда в известняковых породах, состоявших главным образом из карбоната кальция, начали образовываться древнейшие окаменелости существ с наружными или внутренними скелетами. Скелеты обнаружены в таких сильно удаленных друг от друга местах, как Сибирь, Бразилия

и Намибия, серьезно различаются размерами и формой и принадлежат разным, относящимся к неродственным друг с другом группам. А это наводит на мысль, что в то далекое время в глобальном масштабе действовала некая мощная движущая сила, направлявшая ход эволюции. Мы в точности не знаем, что она собой представляла, но некоторые соображения у нас имеются. Образование скелета требует от животного значительного расхода энергии, а потому, если оно отваживается на такую попытку, выгоды от нее должны превышать издержки. Животные обзаводятся скелетами по самым разным причинам, но наиболее обычная из них — защита от хищников. Хотя ископаемых свидетельств существования хищников в рассматриваемый период времени пока не найдено, не исключено, что появление

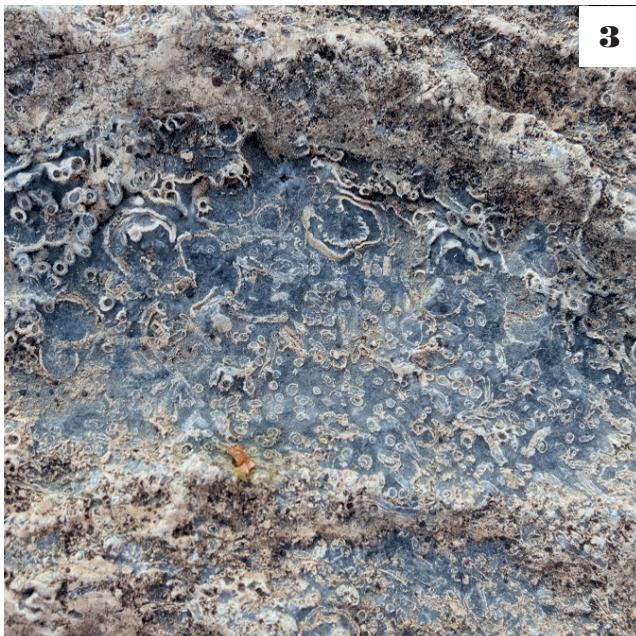
SOURCE: "INTEGRATED RECORDS OF ENVIRONMENTAL CHANGE AND EVOLUTION CHALLENGE THE CAMBRIAN EXPLOSION," BY RACHEL WOOD ET AL., IN NATURE ECOLOGY & EVOLUTION, VOL. 3, APRIL 2019; Illustration by Franz Antoniny (Gosais)



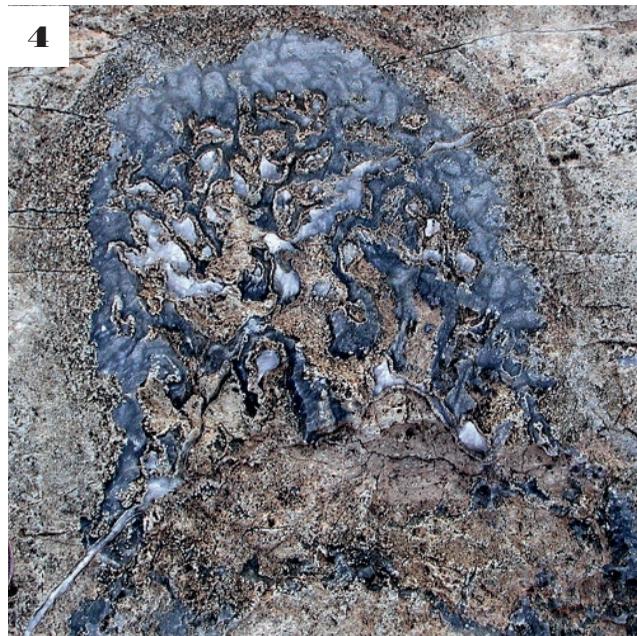
1



2



3



4

Запечатленные в камне. Клаудина (*Cloudina*) — одно из древнейших существ с наружным скелетом, напоминавшим стопку тонкостенных конусов (1). Клаудины могли намертво прикрепляться друг к другу с помощью клейкого материала и образовывать рифы. Намакалат (*Naamacalathus*) — еще одно древнее животное со скелетом (2). Твердые чашевидные части тел этих существ обычно образуют большие скопления. Окаменелости клаудины и намакалата нередко встречаются вместе (3). Еще одним спутником клаудины была намапойкия (*Naamapoikia*), которая обычно росла в укромных уголках морского рифа (4).

скелетов связано с возникновением животных, питающихся своими собратьями, и их быстрым и широким распространением по планете.

Сила коллектива

Недавно проведенный анализ древнейших скелетов животных позволил ученым получить некоторое представление об облике и образе жизни их обладателей. Одно из таких существ — клаудина (*Cloudina*), чей хрупкий трубчатый скелет достигал длины 7 см и напоминал стопку вставленных друг в друга вафельных стаканчиков для мороженого. Клаудина — неременный участник всех наших реконструкций эдиакарских экосистем — впервые была обнаружена в 1972 г. в Намибии и долгие годы считалась «сидячим» организмом,

прикреплявшимся к морскому дну. В последние годы, однако, ученые обнаружили в разных частях света множество новых ее экземпляров, в корне изменивших подобное представление. Изучая ископаемые образцы клаудины из Намибии, возглавляемая мной группа исследователей показала, что стили роста и жизни этих существ были весьма разнообразными. Так, они могли прикрепляться к микробным пленкам, покрывавшим мягкие осадки на морском дне, или расти на холмиках, образованных цианобактериями. Но самое главное — клаудины могли намертво прикрепляться друг к другу и образовывать своего рода рифы. Это открытие заставляет рассматривать клаудину как одно из древнейших рифообразующих животных и, таким образом, отодвигает сроки появления способности животных к «сооружению» рифов примерно на 20 млн лет назад.

Неизвестно, состояла ли клаудина в родственных отношениях с современными строителями рифов (например, кораллами), но мы предполагаем, что жила она в компании с другими животными. На это указывают находки ископаемых скелетов других организмов в горных породах такого же возраста, что и породы, содержавшие окаменелости клаудины. Одним из ее постоянных спутников, похоже, был намакалат (*Namacalathus*) — существо, чьи окаменелости найдены в самых разных местах планеты. Его скелет достигал в длину 5 см и состоял из изящного тонкостенного стебелька, увенчанного чашечкой с одним отверстием на вершине и несколькими отверстиями по бокам. Мягкие ткани животного, вероятно, находились внутри чашечки, но, к сожалению, они не подвергались окаменению и до наших дней не сохранились. Останки намакалатов указывают на то, что они нередко росли рядом с клаудиной, прикрепившись к микробным пленкам на морском дне.

Тесная дружба связывала клаудину и с намапойкией (*Namapoikia*), чьи останки были найдены только в Намибии. Это животное отличалось крупными размерами (до 1 м в диаметре) и прочным массивным скелетом. Судя по форме роста, оно представляло собой губку и в отличие от клаудины и намакалата, обладавших лишь наружным скелетом, должно было иметь внутренний скелет. Любопытно, что намапойкия росла в укромных уголках рифов, покрывая плотной коркой вертикальные

стенки их трещин и расщелин. Здесь нелишне отметить, что сообщества животных и растений, живущие на открытых поверхностях современных рифов, сильно отличаются по составу от сообществ, населяющих различные укрытия в рифах (пещеры, трещины или гроты). Найденные нами эдиакарские окаменелости свидетельствуют о том, что такая закономерность стара, как и сами рифы.

Образование рифов представляло собой важную экологическую инновацию. Живя тесными компаниями и даже прочно прикрепляясь друг к другу, животные увеличивали свою механическую прочность, поднимались над морским дном и обитавшими здесь конкурентами, повышали эффективность пищевого поведения и получали надежную защиту от хищников. Можно думать, что возникновение рифов, как и появление скелетов, стало следствием возрастания и усложнения экологического давления на животных в эдиакарии. Началась стремительная «гонка вооружений» между хищниками и жертвами, а вместе с ней — и подготовка к эволюционному кембрийскому взрыву.

Животный мир эдиакария

К середине текущего десятилетия окончательно выяснилось, что граница между эдиакарским и кембрийским периодами выражена менее отчетливо, чем долгое время полагали ученые. Стало очевидно, что животные научились обзаводиться скелетами и образовывать рифы намного раньше, чем было принято считать прежде. Кроме того, разработанные модели экосистем показали, что эдиакарские и кембрийские сообщества животных имели много общего. Таким образом, оказалось, что подготовка к кембрийскому взрыву заняла гораздо более длительное время, чем традиционно полагали палеонтологи.

Благодаря ряду важных открытий, сделанных несколько лет назад в Сибири и Китае, граница между животным миром эдиакария и кембрия стала еще более расплывчатой. Команда ученых из Китая и Германии обнаружила, что клаудина продолжала существовать и в кембрийском периоде. А наша группа палеонтологов совместно с российскими и китайскими коллегами нашла в эдиакарских породах окаменелости, долгое время считавшиеся уникальными для кембрийского периода. Находки окончательно убедили нас в том, что для решения загадки

кембрийского взрыва необходимо лучше понять условия жизни в эдиакарии, когда и возникли описанные выше животные.

Особый интерес вызвала у ученых динамика доступности кислорода. Кислород необходим животным для жизни, а потому основные споры за последние несколько лет разгорелись вокруг следующего вопроса: не мог ли его уровень в какой-то момент времени эдиакария или кембрия превысить некое критическое значение и обусловить тем самым процветание животных? На самом деле этот вопрос гораздо сложнее, чем кажется на первый взгляд: ведь потребности животных в кислороде сильно разнятся. Просто устроенным, неподвижным существам вроде губок его требуется гораздо меньше, чем подвижным животным — особенно активным, быстро плавающим хищникам. В ходе наших исследований мы постоянно учитывали эти различия.

Геохимики разрабатывают новые изотопные и другие методы анализа, которые смогли бы уточнить наши представления о доступности кислорода на древней Земле. А тем временем наша команда исследователей продолжает поиск окаменелостей в Сибири и других удаленных и до сих пор малоизученных местах планеты

К счастью, в последние годы было разработано множество надежных геохимических методов определения уровня кислорода в водах древних морей. Особенно эффективным оказался подход, использующий оценки характеристик различных соединений железа, которые ведут себя по-разному в присутствии и в отсутствие кислорода. Данный метод позволяет увидеть, в каких местах и когда уровень кислорода был достаточно высоким для поддержания жизнедеятельности сложно устроенных животных. Исследования, проведенные с его помощью, позволили сделать вывод, с которым соглашаются большинство ученых: в эдиакарском периоде содержание

растворенного в океанах кислорода, вероятно, достигло уровня, который, несмотря на непрерывно возрастающие подвижность и активность животных, обеспечивал удовлетворение их метаболических потребностей. Это обстоятельство и дало животным возможность резко увеличить свое разнообразие.

Сейчас в распоряжении ученых имеется достаточно много геохимических данных, позволяющих судить не только об уровне кислорода в отдельных эдиакарских местонахождениях окаменелостей определенного возраста, но и об изменении его глобального уровня со временем. Анализ показывает, что паттерны распределения кислорода на планете на всем протяжении эдиакария и в раннем кембрии значительно отличались от современных. Так, для морей многих регионов Земли был характерен сравнительно тонкий поверхностный слой воды, сильно насыщенный кислородом, под которым находились бедные кислородом глубинные воды (это явление называется аноксией).

Имеющиеся геохимические данные показывают также, что на протяжении рассматриваемого отрезка времени граница между бедными и богатыми кислородом слоями воды была очень динамичной, периодически опускалась и поднималась в зависимости от колебаний уровня моря. Вполне вероятно поэтому, что области морских мелководий, населенные ранними животными, оказались даже еще более узкими, чем ожидали ученые, — крошечные оазисы насыщенной кислородом воды. Таким образом, эволюция животных в эдиакарии и раннем кембрии протекала при сравнительно низком, но сильно колебавшемся уровне кислорода. Как же такие условия могли способствовать фантастической диверсификации животных?

Двигатели инновационного процесса?

Периоды повышенной аноксии на морском дне совпадают по времени с рядом знаменитых периодов массового вымирания видов (например, вымиранием видов в конце пермского периода 252 млн лет назад, приведшим к исчезновению более 90% всех видов морских животных). Между тем во время продолжительных интервалов динамичной аноксии на морских отмелях начались и некоторые из важнейших диверсификаций животных — эдиакарско-кембрийская, ордовикская, начавшаяся на 100 млн лет позднее, и триасовая

(около 247 млн лет назад). Учитывая данное обстоятельство, мои коллеги из Смитсоновского института и я предположили, что, возможно, колебания уровня кислорода создали некие критические условия для возникновения эволюционных инноваций у мягкотелых животных.

Животным гораздо легче образовывать скелеты из известняка (материала, из которого состоят раковины моллюсков, скелеты кораллов и других морских существ), когда уровень кислорода в морской воде превышает 10 мкмоль/л. Не исключено, что мягкотелые животные стали способными образовывать известковые скелеты только после того, как содержание кислорода в воде превысило этот порог, что в свою очередь привело к расширению прежде ограниченных мелководных оазисов жизни, их слиянию друг с другом и распространению в глобальном масштабе.

Нам еще предстоит узнать много нового о том, как живые существа реагировали на изменение доступности кислорода в ходе эволюции. Скорее всего, подобные реакции имели сложный характер, потому что животным приходилось противостоять многим неблагоприятным факторам среды (например, росту хищничества) и потому что в этом уравнении фигурировали также обратные связи между отдельными организмами, экосистемами и оболочками планеты.

Впереди нас ждет огромная работа. Региональные геологические процессы, формировавшие земную кору на протяжении эдиакария и кембрия, оставили в наследство множество пробелов в геологической и палеонтологической летописи планеты. Это означает, что ученым предстоит обобщить все известные факты возникновения сложно устроенных животных, полученные в результате анализа окаменелостей из самых разных регионов планеты, и объединить их в единую картину. Задачу сильно осложняет и по-прежнему неудовлетворительное датирование основных эдиакарских местонахождений окаменелостей. Обычно мы датировем горные породы этого возраста, определяя соотношения концентраций свинца и урана в кристаллах циркона из ближайших отложений пепла, выброшенного при извержении древних вулканов. К сожалению, многие из наиболее богатых местонахождений ископаемых останков лишены таких отложений. В результате мы не в состоянии точно соотнести эволюционные изменения,

произошедшие в разных частях планеты, что необходимо для воссоздания истинной временной последовательности событий. В качестве наглядного примера можно привести вызывающие горячие споры находки в Ланьтяньской формации в Китае. Здесь были найдены одни из самых древних ископаемых останков животных, датировка которых может дать любой возраст в диапазоне от 635 до 590 млн лет.

И тем не менее у нас есть все основания для оптимизма. На планете постоянно обнажаются все новые отложения древнего вулканического пепла, а ученые разрабатывают все более точные методы геологического датирования. Так, недавно проведена повторная датировка слоев пепла, которые многие исследователи использовали для оценки возраста эдиакарских окаменелостей из Намибии. В результате возраст самых молодых из них оказался более чем на 2 млн лет меньше, чем считалось прежде. Данный факт поднимает важные вопросы об истинной корреляции намибийских окаменелостей с их аналогами с острова Ньюфаундленд, из Сибири и других мест. Кроме того, геохимики разрабатывают все новые изотопные и другие методы анализа, которые смогли бы уточнить наши представления о доступности кислорода на древней Земле. А тем временем наша команда ученых и другие группы исследователей продолжают поиск окаменелостей в Сибири и других удаленных и до сих малоизученных местах планеты.

Я верю, что в самом скором времени палеонтологи, стоя на вершинах древних сибирских скал и глядя на простирающуюся внизу бескрайнюю тайгу, будут испытывать гордость от мысли, насколько лучше по сравнению со своими предшественниками они стали понимать далекое прошлое нашей планеты. ■

Перевод: А.В. Щеглов

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Левинтон Д. Большой взрыв эволюции животных // ВМН, № 1, 1993.
- Low-Oxygen Waters Limited Habitable Space for Early Animals. R. Tostevin et al. in Nature Communications, Vol. 7, Article No. 12818; September 23, 2016.
- A Deep Root for the Cambrian Explosion: Implications of New Bio- and Chemostratigraphy from the Siberian Platform. M. Zhu et al. in Geology, Vol. 45, No. 5, pages 459–462; May 1, 2017.
- Integrated Records of Environmental Change and Evolution Challenge the Cambrian Explosion. Rachel Wood et al. in Nature Ecology & Evolution, Vol. 3, pages 528–538; April 2019.

КАК МАТЕРИЯ СТАНОВИТСЯ СОЗНАНИЕМ

НЕЙРОБИОЛОГИЯ

Благодаря новому подходу к изучению биологических нейросетей можно увидеть, как при определенном взаимодействии разных частей мозга возникает психическая деятельность

Даниэль Бассетт и Макс Бертолеро

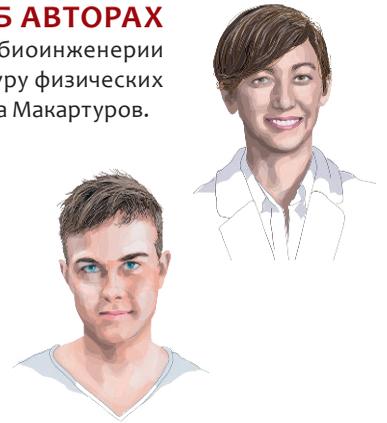
Наша жизнь наполнена сетями. Каждый день мы используем сложные сети автомобильных и железных дорог, перемещаемся по морским и воздушным путям. Но сети существуют и за пределами нашего непосредственного восприятия. Вспомните всемирное интернет-пространство, энергосеть и Вселенную, в которой Млечный Путь — лишь маленький узел в кажущейся бесконечной сети галактик. Однако очень немногие сети по сложности соответствуют той, которая расположилась внутри вашего черепа.



ОБ АВТОРАХ

Даниэль Бассетт (Danielle Bassett) — доцент факультета биоинженерии в Пенсильванском университете, изучает сетевую структуру физических и биологических систем. В 2014 г. получила стипендию Фонда Макартуров.

Макс Бертолеро (Max Bertolero) — сотрудник Лаборатории сложных систем, которой руководит Бассетт, защитил диссертацию по системной нейрофизиологии в Калифорнийском университете в Беркли, а высшее образование в области философии и психологии получил в Колумбийском университете.



В последние годы нейронаука оказалась в центре внимания и многие люди познакомились с ярко раскрашенными картинками, на которых показано, как области мозга «загораются» при выполнении разных мыслительных задач. Есть, например, височная доля, находящаяся рядом сухом, которая вовлечена в процессы памяти, или расположенная сзади затылочная доля, специализирующаяся на зрении.

В таком описании функций нет объяснения, как эти отделы взаимодействуют, порождая в итоге личность. Наша лаборатория, как и многие другие, позаимствовала из математической теории графов язык, на котором можно описывать, исследовать и предсказывать сложные взаимодействия внутри мозга. Это сокращает кажущийся огромным разрыв между лихорадочной электрической активностью нейронов и когнитивными задачами: восприятием, запоминанием, принятием решений, обучением навыкам и запуском движений. Новый подход к изучению биологических нейронных сетей основывается на представлении, что разные отделы мозга выполняют определенные функции, и подтверждает это. По своей сути мозг, а следовательно и мы как мыслящие существа, представляет собой обширную сеть, состоящую из почти 100 млрд нейронов, имеющих по меньшей мере 100 трлн точек соединения, то есть синапсов.

На основе данных, полученных методами нейровизуализации, мы можем сегодня построить граф, состоящий из узлов и ребер. Узлы графа

представляют собой функциональные единицы сети, например нейроны, или в другом случае — аэропорты. Ребра соединяют узлы между собой: представьте себе один нейрон, связанный с другим, или маршруты полета авиакомпании. В нашей работе человеческий мозг упрощается примерно до 300 узлов. Различные области могут быть связаны между собой ребрами, обозначающими пучки белого вещества, соединяющие отделы мозга. Благодаря такому описанию мозга как единой сети уже была получена более понятная картина реализации когнитивных функций, что принесло и практическую пользу — в виде улучшения методов диагностики и лечения психиатрических заболеваний. А в будущем понимание сетевой структуры мозга станет способствовать разработке улучшенного искусственного интеллекта, появлению новых медицинских препаратов и способов электростимуляции для исправления нарушений нейронных связей, например при депрессии, а также, возможно, разработке генетических методов коррекции психических заболеваний.

Мозг как оркестр

Для начала, чтобы понять, как в нейросетях формируются наши когнитивные способности, рассмотрим аналогию с оркестром, исполняющим симфонию. До недавнего времени нейробиологи в основном исследовали работу отдельных структур мозга изолированно от других. Это как слушать отдельно игру ударных, духовых и струнных

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Как мозг порождает личность? Благодаря этому вопросу возник новый подход к изучению биологических нейронных сетей. Математическую теорию графов используют для моделирования таких соединений нейронов в мозге, которые позволяют нам читать, считать или просто сидеть и постукивать пальцами.
- Теория графов, часто используемая химиками, квантовыми физиками и лингвистами, моделирует те физические процессы, которые приводят к появлению функциональных нейронных сетей, отвечающих за возникновение наших когнитивных способностей, например зрения, внимания или самоконтроля.
- Разбираясь в устройстве таких сетей на все более высоком уровне абстракции, специалисты начали устранять разрыв между материальной работой мозга и психикой. Это может иметь и практическую пользу — способствовать улучшению диагностики и лечения таких заболеваний, как, например, депрессия.

инструментов. Такой подход к изучению мозга восходит еще к Платону: разделить природу на естественные части и изучать их по отдельности.

Понимать, как миндалевидное тело участвует в эмоциональном процессе, так же важно, как и то, как скрипка издает звуки высокой частоты. Однако даже полный перечень структур мозга и их функций (зрение, движение, эмоции и т.д.) не объясняет, как на самом деле работает мозг, так же как список музыкальных инструментов — не партитура «Героической симфонии» Бетховена.

Специалисты по биологическим нейросетям начали разбираться в этих загадках. Ученые выясняют, каким образом каждый из отделов мозга встроен в большую сеть, объединяющую несколько отделов, и как такие сети образуют систему еще более высокого уровня, которая называется «мозг». Здесь есть два основных подхода. Первый — это изучение структурных связей для идентификации инструментов мозгового оркестра, то есть выявление физических процессов создания музыки и того набора инструментов, который определяет, что можно исполнить. Состав оркестра очень важен, но это не сама музыка. Другими словами, так же как инструменты не отражают исполняемую музыку, нейронные связи не воспроизводят работу мозга.

Второй подход основан на том, что живой мозг — это большой оркестр из нейронов, которые возбуждаются вместе, строго подчиняясь определенным закономерностям. Измеряя корреляции между активностью в каждой паре областей, показывая согласованность их работы, мы можем услышать «музыку» мозга. Такая согласованная работа называется функциональной связанностью, и именно ее можно сравнить со звучанием того самого нейронного оркестра. Если в двух местах колебания активности происходят одновременно, то эти области считаются функционально связанными. Подобная синхронность не менее важна, чем сами звуки, идущие от валторны или альты. Уровень активности электрических сигналов в той или иной области мозга можно рассматривать как громкость звучания музыки.

При этом в каждый конкретный момент в нашем полуторакилограммовом мозге некоторые области более активны, чем другие. Наверняка все слышали выражение, что человек использует мозг не на полную мощность. На самом деле весь мозг постоянно активен, но для каждой задачи требуется превышение базового уровня активности только у части структур.

Однако это не означает, что вы используете свои когнитивные возможности лишь наполовину. Если бы действительно весь ваш мозг стал максимально активен, это было бы похоже на музыкантов, каждый из которых играет с наибольшей громкостью. Вместо нормального взаимодействия получился

бы хаос. Такой оглушающий звук не сможет передать все эмоциональные оттенки, присутствующие в великом музыкальном произведении. Все вместе — интонация, ритм, темп и основные паузы — передают информацию и в музыкальных произведениях, и в процессах, происходящих в нашей голове.

Модульный принцип организации

Подобно тому как в оркестре можно определить группы инструментов разных семейств, так и в мозге можно выделить модули — наборы узлов, образующие локальную сеть. Такому принципу подчиняются все нервные системы. Даже у нематоды *Caenorhabditis elegans* сеть из 302 нейронов образует модульную структуру. Узлы внутри одного модуля связаны друг с другом сильнее, чем с узлами из других модулей.

Каждый модуль в мозге выполняет свою определенную функцию, так же как и каждое семейство инструментов при исполнении симфонии. Недавно мы сделали обзор огромного количества независимых исследований, так называемый метаанализ, куда вошли данные более чем 10 тыс. экспериментов с использованием функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ), в которых испытуемые суммарно выполнили 83 когнитивных задачи. Мы обнаружили, что в различных задачах задействованы разные модули нейронной сети мозга. Есть модули, отвечающие за внимание, память и самоанализ. Другие, как мы выяснили, занимаются слухом, зрением и управлением движениями.

Такие сенсорные и моторные когнитивные процессы запускают работу отдельных соседних модулей, расположенных, как правило, в пределах той же доли мозга. Мы также обнаружили, что вычислительные процессы в этих модулях не вызывают активности других модулей. Представьте себе ситуацию, когда каждый музыкант в оркестре должен брать другие ноты. Оркестр выйдет из-под контроля и, конечно, приятной мелодии не получится. Это касается и обработки информации в мозге — каждый модуль должен функционировать более-менее независимо. Такую необходимость отмечали как древние (Платон), так и современные (Джерри Фодор) философы, и это подтверждается нашими исследованиями.

Несмотря на то что модули мозга работают в основном независимо, для получения симфонии надо, чтобы все семейства инструментов звучали в унисон. Информация, возникающая в одном модуле, должна в итоге составить единое целое с результатом работы других. Если смотреть фильм только с помощью зрительной системы, без использования эмоций, это очень обеднит впечатления.

Поэтому для выполнения многих сложных когнитивных задач разные модули должны работать

Расшифровка ста триллионов сообщений

В Млечном Пути содержатся сотни миллиардов звезд, но это немного по сравнению с 100 трлн связей нашего мозга, которые позволяют нам ощущать, думать и действовать. Чтобы разобраться в этой сложности, нейробиологи построили карту, или граф, состоящий из узлов, соединенных друг с другом через узлы-концентраторы, обладающие большим количеством связей.

От модулей и узлов к мыслям

Совокупности узлов образуют модули, которые в том числе отвечают за зрение, внимание и двигательную активность **А**. Некоторые узлы работают как локальные концентраторы, они связывают другие узлы внутри одного модуля. Узел, который связывает много модулей, называется соединяющим концентратором **В**. Разнообразные связи между модулями мозга важны для выполнения многих задач, особенно при сложных формах поведения **С**.



Модули мозга

- Зрительный
- Внимание
- Лобно-теменной контроль
- Соматические движения
- Салиентность
- Пассивный режим
- Лимбический

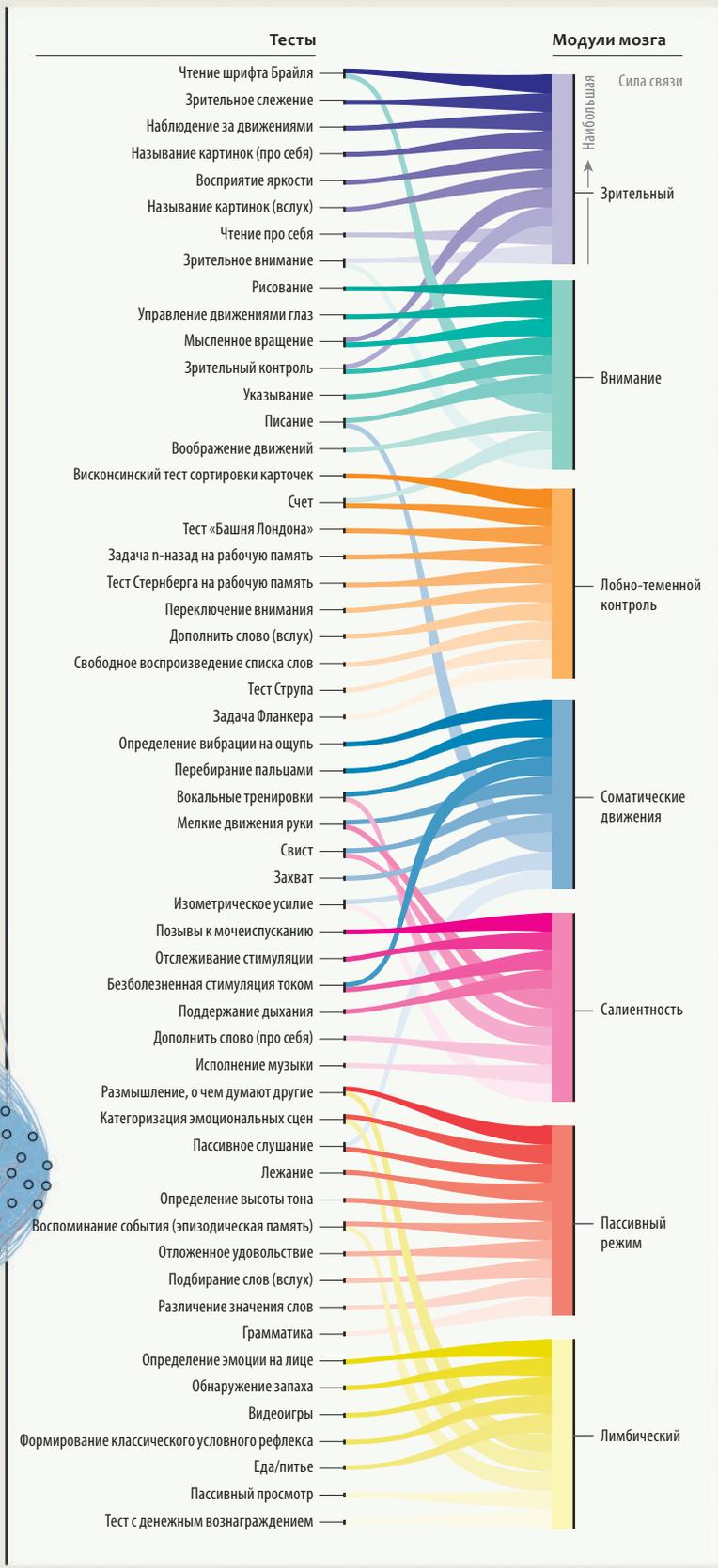
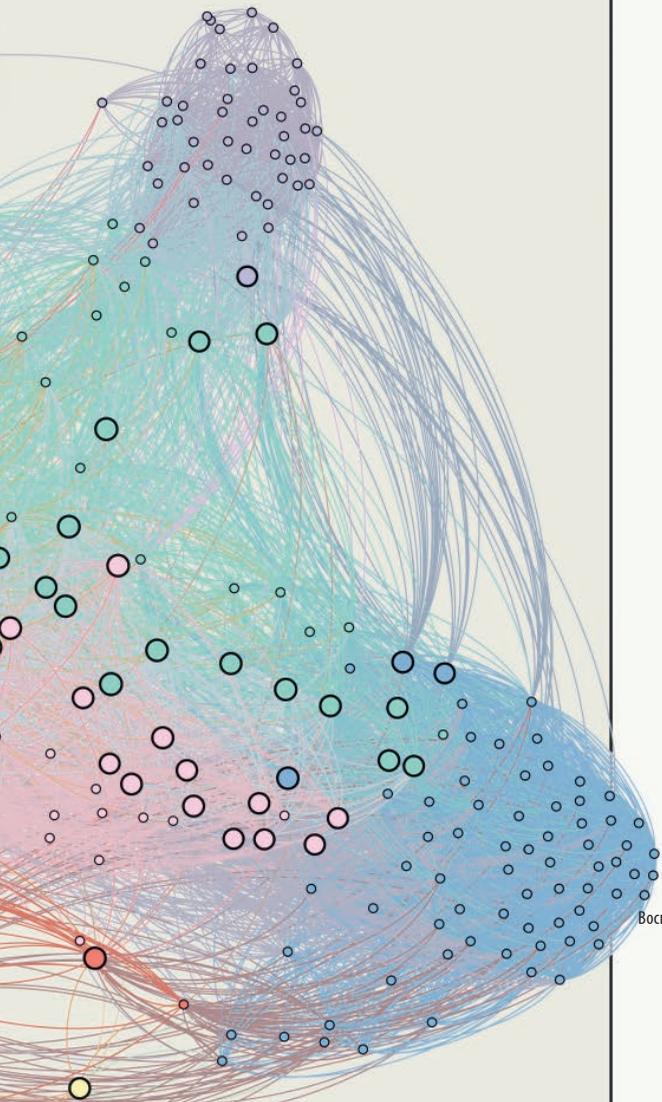
А Семь ключевых модулей, обозначенные разными цветами, распределены по разным областям мозга, иногда удаленным друг от друга.

В У концентраторов есть мощные связи с несколькими модулями. На этом виде сбоку цвет концентратора соответствует цвету модуля мозга.

С Граф узлов и ребер сети мозга человека. Большими кругами показаны соединяющие концентраторы. Цвет каждого узла означает модуль, к которому он относится. Узлы можно представить как отталкивающиеся магниты, а ребра — как пружины, скрепляющие их. Тесно связанные узлы группируются вместе. Соединяющие концентраторы занимают центральное положение, так как они связывают все модули.

Свести в единое целое

Модули зрения, внимания и других когнитивных функций предназначены для выполнения специфических задач, которые часто оценивают с помощью психологических тестов. Задачи, требующие максимальной активности, расположены наверху в списке. Например, зрительный модуль связан с названием, чтением и наблюдением. В некоторых тестах требуется активность многих модулей. Так, для мысленного поворота фигур нужна работа зрительного модуля и внимания. Лобно-теменной модуль вовлечен в задачи на переключение или воспроизведение списков слов. Модуль пассивного режима занимается субъективным эмоциональным состоянием или пассивным слушанием, когда человек отдыхает.



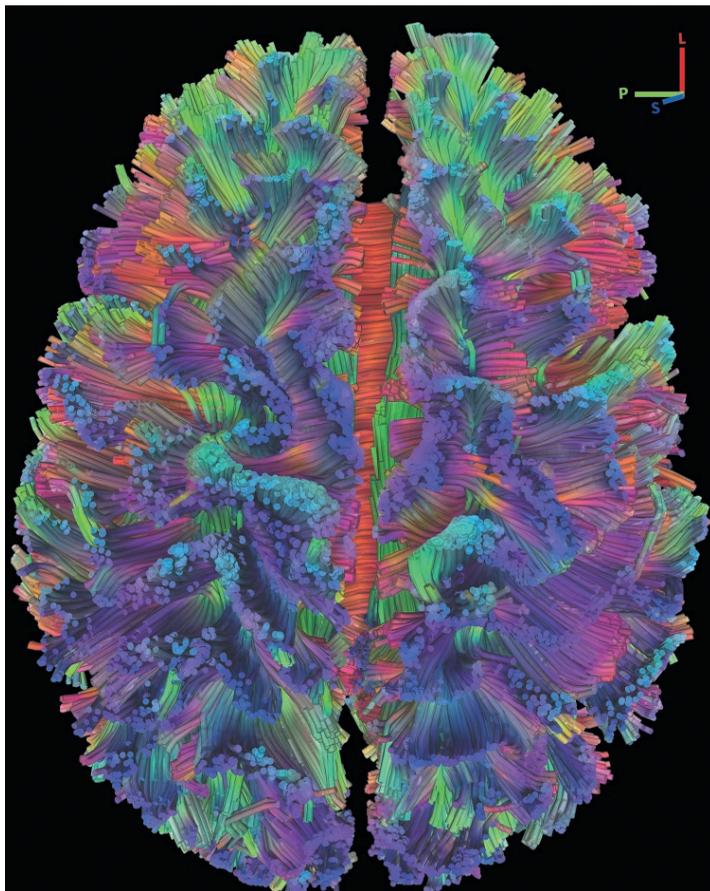
совместно. Например, задание на кратковременную память — удержать в голове новый телефонный номер — требует объединения модулей, отвечающих за слух, внимание и обработку памяти. Для объединения и контроля активности нескольких модулей в мозгу используются концентраторы (хабы) — узлы, в которых сходятся сигналы от разных модулей.

Некоторые модули, контролирующие и интегрирующие активность мозга, менее избирательны, чем другие. Их связи распространяются на несколько долей. Лобно-теменной контрольный модуль охватывает лобную, теменную и височную доли. В эволюции он возник относительно недавно. У людей по сравнению с нашими ближайшими обезьяньими родственниками этот узел развит особенно хорошо. Он функционирует как дирижер оркестра, активируясь во время выполнения многих когнитивных задач.

Лобно-теменной модуль гарантирует, что все другие модули мозга работают в унисон. Он активно задействован в реализации исполнительной функции, объединяя отдельные процессы принятия решений, кратковременной памяти и когнитивного контроля. Последнее — это способность разрабатывать сложные стратегии действий и тормозить нежелательное поведение.

Еще один модуль, обладающий обширными связями, называется модулем салиентности. Он подсоединен к лобно-теменному модулю и отвечает за ряд поведенческих реакций, связанных с вниманием и реакцией на новые стимулы. Рассмотрим, например, два слова: **синий** и **красный**. Если вас попросить назвать цвет, которым написано каждое слово, то вы быстрее назовете красный. В случае зеленого цвета будут сильнее активироваться лобно-теменной и салиентный модули, поскольку вы должны затормозить естественное желание назвать синий — тот цвет, который заключен в смысле написанного слова.

И, наконец, модуль работы в пассивном режиме расположен в тех же долях, что и лобно-теменной. Он состоит из многих концентраторов, связанных с такими разными когнитивными задачами, как самоанализ, обучение, извлечение памяти, обработка эмоциональной информации, определение ментального состояния других и даже рискованное поведение. Важно, что повреждение таких модулей, содержащих большое количество концентраторов, нарушает функциональную связанность мозга и приводит к обширным когнитивным проблемам — точно так же как плохая погода в узловом аэропорту приводит к задержкам рейсов по всей стране.



Множество связей, показанное на этой томограмме, используется для построения модели путей передачи информации в мозге. Функциональные сети применяют эти структурные пути для выполнения многих когнитивных задач.

Индивидуальные связи

Несмотря на то что в наших мозговых сетях присутствует схожий набор основных компонентов, таких как модули, связанные узлами, у каждого есть свои небольшие особенности организации нервных связей. В последнее время исследователи тщательно изучают подобное разнообразие. На первом этапе проекта «Коннектом человека», финансируемого Национальными институтами здоровья, ученые исследовали архитектуру мозговых сетей у 1,2 тыс. молодых людей. Финальной целью проекта было охватить все периоды жизни. Структурную и функциональную связанность оценивали с помощью фМРТ. Данные были дополнены набором тестов и опросников, анализирующих 280 поведенческих и когнитивных черт. Участники исследования рассказали о том, как они спят, как часто употребляют алкоголь, о своих языковых способностях, памяти и эмоциональном состоянии. Нейробиологи со всего мира начали анализировать этот невероятно огромный массив информации, чтобы понять, как наш мозг кодирует нашу личность.

С помощью данных, полученных от сотен испытуемых из проекта «Коннектом человека», наша лаборатория и другие показали, что каждый человек отличается своим характерным распределением связей в мозге, это так же уникально, как и отпечаток пальца. У людей с сильными связями между определенными областями были богатый лексикон, хороший подвижный интеллект, помогающий решать новые задачи, а также они могли откладывать получение удовольствия. Они были более образованы и больше удовлетворены жизнью, имели хорошие память и внимание. Те, у кого связи между этими областями были слабее, обладали низкой подвижностью интеллекта, они имели опыт употребления психоактивных веществ, хуже спали и испытывали трудности с концентрацией внимания.

Основываясь на этом исследовании, мы показали, что такие результаты могут быть описаны с помощью особенностей связей между концентраторами. Если в сети вашего мозга есть сильные концентраторы, связывающие много модулей, в ней, скорее всего, будут модули, которые работают достаточно независимо друг от друга. И в этом случае у вас будет лучше развит ряд способностей — от кратковременной памяти до математики, знания языков и понимания социальных отношений. Проще говоря, все ваши мысли, чувства, странности, недостатки и сила духа записаны в особенностях организации вашего мозга, если рассматривать его как цельную интегральную сеть. Словом, музыка, которую исполняет мозг, и есть то, что делает вас самим собой.

Синхронизированная работа модулей мозга не только формирует вашу личность, но и поддерживает ее стабильность во времени. Композиция, которую они исполняют, всегда примерно одинакова. Это сходство было замечено в двух других работах проекта «Коннектом человека», где испытуемым давали разные задания, требующие кратковременной памяти, распознавания эмоций другого человека, учета риска в играх, постукивания пальцами, языковых, математических или социальных навыков, а также произвольного состояния покоя, в котором надо было отпустить свой разум «блуждать».

Удивительным образом все эти действия давали похожую картину активации сетей. Возвращаясь к нашей аналогии с оркестром, неверно считать, что мозг, когда решает математическую задачу, исполняет произведения Баха, а когда отдыхает — хип-хоп. Симфония у нас в голове играет одними и теми же музыкантами в одном и том же стиле. Это постоянство возникает из-за того, что в нейросети мозга сигнал от нейрона к нейрону может передаваться только там, где физически имеются структурные связи в виде пучков волокон. И от структурных связей зависит, как могут быть

настроены функциональные связи, например, для математики или для языка. Пользуясь музыкальной метафорой: бас-барабан не может играть мелодию так, как пианино.

Как у оркестра появляются новые аранжировки, так же и в мозговой музыке неизбежно возникают изменения. Физические связи меняются в течение месяцев и лет, а функциональные — за секунды, когда человек переключается с одного типа мыслительной деятельности на другой.

Важные изменения структурных и функциональных связей происходят в подростковый период, когда окончательно дорабатывается система связей в мозге. Это ключевой критический период, так как именно у подростков часто проявляются первые признаки психических заболеваний.

Одно из направлений нашего исследования посвящено тому, как нейросети мозга развиваются в детском, подростковом и взрослом возрасте. Эти процессы направляются глубокими физиологическими изменениями, а также на них влияют обучение, знакомство с новыми идеями и навыками, социально-экономический статус человека и другие аспекты жизненного опыта.

Модули в сетевой организации мозга появляются очень рано, еще в утробе матери, но их связи совершенствуются по мере нашего развития. В детстве усиление связей между концентраторами связано с обособлением модулей и ростом эффективности выполнения задач, требующих исполнительного контроля, таких как сложные логические построения и управление своим поведением. Мы выявили также, что у детей с более высоким социально-экономическим статусом модули быстрее начинают работать независимо друг от друга, и это подчеркивает важность влияний окружающей среды.

Хотя структурные изменения связей — довольно медленный процесс, функциональные перестройки происходят достаточно быстро, за несколько секунд или минут. Эти изменения способствуют переключению между разными задачами или даже между разными навыками в рамках одного задания. В серии наших работ, которые публиковались с 2011 г. и по сегодня, мы выявили, что у людей, имеющих лучшие исполнительные функции и способность к обучению, модули в сетевой структуре переключаются легко.

Для того чтобы детальнее разобраться в происходящем, мы воспользовались общедоступной базой данных, полученной в знаменитом исследовании «Мой коннектом» (*MyConnectome*), в котором профессор психологии Стэнфордского университета Рассел Полдрак (Russell Poldrack) более года три раза в неделю сканировал свой мозг и выполнял когнитивные тесты. И хотя модули обычно работают независимо и изолированно друг от друга, время от времени мозг перестраивает их связи.

Данная способность называется «функциональная гибкость сети». Она позволяет узлу, имеющему сильные функциональные связи внутри одного модуля, выстроить вдруг множество связей с другим модулем, изменив поток информации внутри всей сети. С помощью данных, полученных в исследовании Полдрака, мы обнаружили, что изо дня в день происходит перенаправление информации внутри сети, что совпадает с хорошим настроением, бодростью или усталостью. У здоровых испытуемых такая гибкость коррелирует с хорошими когнитивными способностями.

Рассогласование

Структура мозговых связей также отражает и психическое здоровье. Депрессия, шизофрения, болезни Альцгеймера и Паркинсона, расстройства аутического спектра, синдром дефицита внимания, деменция и эпилепсия сопровождаются аномальным распределением связей.

Большинство психических заболеваний не ограничены одной областью мозга. Нарушение связей при шизофрении наблюдается по всему органу. Согласно одной из гипотез возникновения шизофрении, в работе отдельных модулей нет патологии, а все нарушения связаны с переизбытком связей между ними.

В здоровом мозге модули работают независимо и изолированно друг от друга, а также способны к пластичному изменению связей внутри сети, что полезно для когнитивных функций, но только в определенных пределах. В нашей лаборатории мы выявили, что у людей с шизофренией и их ближайших родственников наблюдается повышенная легкость перестройки связей в сети. Когда в узле неожиданно переключается связь между слуховым и речевым модулем, могут возникать слуховые галлюцинации. Такое нежелательно смещение может вызывать ощущение бормотания в голове.

Так же как и шизофрения, клиническая депрессия не вызвана нарушением в работе одного отдела мозга. По-видимому, в ее проявлении участвуют три определенных модуля: лобно-теменной, салиентности и пассивного режима. И действительно, такие симптомы депрессии, как эмоциональная

расторженность, измененная чувствительность к эмоциональным стимулам и руминация, соответствуют этим модулям.

В результате нормальный обмен сообщениями между тремя модулями нарушается. В норме активность одного модуля сменяется активностью другого, поддерживая баланс между когнитивной обработкой сенсорного входа и внутренним переживанием. При депрессии же доминирует модуль пассивного режима, и пациент погружается в руминацию — навязчивое заикливание на неприятных мыслях. Симфония мозга становится еще более разбалансированной, всем оркестром начинает управлять одно семейство инструментов. Эти наблюдения расширили наши представления о свойствах сетевой структуры при депрессии до такой степени, что по распределению связей в мозге мы можем диагностировать разные подтипы заболевания и определить, какие области мозга надо простимулировать электрическим током.

Сети эволюционируют

Специалисты по сетевой структуре мозга не только исследуют ее развитие, но и выясняют, как за десятки тысячелетий могла сформироваться такая сеть. Области, которые определены как концентраторы, совпадают с теми областями мозга, которые наиболее сильно увеличились в процессе эволюции. Сейчас они у человека в 30 раз больше, чем у макаки. Крупные концентраторы с большей вероятностью обеспечат хорошую интеграцию процессов, происходящих в разных модулях, предоставляя воз-

можность проводить более сложные вычисления. Это можно сравнить с увеличением количества музыкантов в оркестре, что позволяет исполнять более сложные мелодии.

Для изучения подобных вопросов нейробиологи использовали и другой способ. Они создали сети с помощью компьютера и подвергли их эволюционному отбору. В нашей лаборатории мы начали изучать эволюционное происхождение концентраторов. Это началось с сети, в которой все ребра были распределены равномерно случайным образом. Следующим шагом сеть была перестроена, далее были сформированы отдельные модули,

При достаточном технологическом развитии мы сможем имплантировать устройства, способные менять или даже создавать новые элементы сети мозга, или же редактировать гены. Такие достижения позволили бы нам лечить болезни и восстанавливать функции мозга после травм и инсультов

среди которых был запущен естественный отбор на способность образовывать графы «мир тесен» (так в науке о сетях называют графы, где две удаленные вершины могут сообщаться друг с другом особенно легко). Тысячи таких сетей начали эволюционировать, в результате чего в каждой появились концентраторы, которые не просто соединяли несколько модулей, но и были сами тесно связаны друг с другом, образуя так называемый клуб. В условиях задачи никак напрямую не требовалось создания таких клубов концентраторов, они просто появились из-за внутренних процессов.

Модель показывает, что для появления у мозга способности обмениваться информацией между модулями одно из возможных эволюционных решений — создание концентраторов с мощными связями. Обратите внимание, что в существующих сетевых структурах, таких как мозг, аэропорты, сети электроснабжения, также имеются надежные концентраторы, тесно связанные друг с другом. Это еще не означает, что эволюция обязательно шла таким путем, как показывает модель, а просто демонстрирует способ, который могла использовать природа.

Образ мыслей

Когда лауреат Нобелевской премии Ричард Фейнман умер в 1998 г., на его меловой доске осталась надпись: «Чего не могу воссоздать, того не понимаю». Получился изящный афоризм, но в нем была упущена важная мысль. Это можно исправить: «Чего не могу воссоздать и контролировать, того не понимаю». Без возможности управления наших знаний достаточно, чтобы наслаждаться симфонией, но мы не можем быть дирижером оркестра.

Что касается мозга, то мы в целом понимаем его структуру и значение его сетевой архитектуры. Хорошо известно, что именно мозг определяет нашу личность, но мы только начинаем понимать, как это происходит. Применив к мозгу представления Пьера Симона Лапласа о детерминизме, можно сказать, что текущее состояние мозга и, следовательно, ментальное состояние человека может быть рассмотрено как следствие его прошлых состояний, зная которые, можно будет предсказывать будущее. Нейробиолог, который знает принципы работы мозга и все о текущем состоянии чье-то мозга, сможет предсказать психическое состояние этого человека в будущем и определить то прошлое, которое сохранилось в его мыслях.

Это знание можно использовать для избавления от боли и страданий, особенно учитывая, что множество психических расстройств связаны с нарушением сетевой структуры. При достаточном технологическом развитии мы сможем имплантировать устройства, которые способны менять или даже создавать новые элементы сети

мозга, или же редактировать гены, чтобы предотвратить появление аномальных сетей, связанных в первую очередь с психическими расстройствами. Такие достижения позволили бы нам лечить болезни и восстанавливать функции мозга после травм и инсультов, а также улучшать их у здоровых людей.

Прежде чем такие футуристические сценарии реализуются, нам нужно ликвидировать два важных пробела. Требуется узнать больше о том, как гены, ранние этапы развития и воздействия окружающей среды формируют структуру нашего мозга и как она приводит к формированию функциональных особенностей. У нейробиологов уже есть некоторое представление о том, как геном обеспечивает появление функциональной структуры сети, однако надо еще понять, как именно происходят эти процессы. Мы только начинаем выяснять, как развивается и формируется сетевая структура мозга под воздействием окружающей среды, и даже еще не приблизились к объяснению всей сложности данного процесса. Внутреннее строение мозга, его структурная связанность ограничивает взаимодействия модулей друг с другом, но нам об этом известно очень немного. По мере того как мы будем ликвидировать пробелы в знаниях, повысятся шансы исправить работу мозга с помощью вмешательства.

Нас тормозит то, что сейчас мы видим мозг довольно нечетко, как если бы мы находились за пределами концертного зала и могли различать лишь очертания инструментов. Нейробиологические исследования показывают, что внутри каждой области мозга каждую миллисекунду возбуждаются миллионы нейронов. А мы можем только косвенно измерять их уровень активности примерно раз в секунду. Таким образом, мы можем определить структурные связи мозга лишь приблизительно. К счастью, ученые и инженеры работают над тем, чтобы получить более четкие данные, которые позволят заглянуть в глубину, наверное, самой сложной сети во Вселенной — в ваш мозг. ■

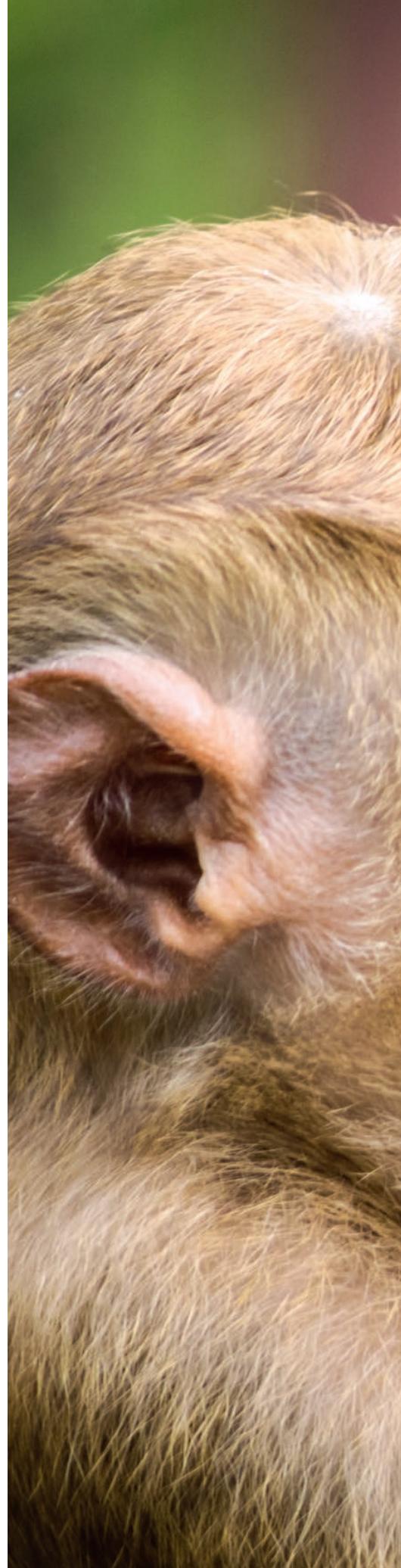
Перевод: М.С. Багоцкая

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Циммер К. Сто триллионов связей // ВМН, № 3, 2011.
- Network Neuroscience. Danielle S. Bassett and Olaf Sporns in Nature Neuroscience, Vol. 20, pages 353–364; March 2017.
- Graph Theory Methods: Applications in Brain Networks, Olaf Sporns in Dialogues in Clinical Neuroscience, Vol. 20, No. 2, pages 111–121; June 2018.
- A Mechanistic Model of Connector Hubs, Modularity and Cognition. Maxwell A. Bertolero et al. in Nature Human Behaviour, Vol. 2, pages 765–767; October 2018.

ОБЕЗЬЯНА — ЭТО МОДЕЛЬ ЧЕЛОВЕКА

В небольшом селе под названием Веселое, недалеко от курортного Адлера, без малого 30 лет существует НИИ медицинской приматологии — «Планета обезьян», как его в шутку называют заезжающие в питомник, — где содержится 5,5 тыс. макак, павианов и мартышек. Научная история этой организации берет начало в далеком 1923 г. с идеи наркома здравоохранения Н.А. Семашко создать в Абхазии учреждение, где ученые могли бы проводить исследования животных со сходными с человеческими анатомо-физиологическими характеристиками. Гуманное отношение к животным, изучение их без причинения страдания — эти принципы были заложены с первых лет работы научной организации. Не зря по подобию этого института в мире потом создадут десятки научных центров.





С 1927 г. ведущие специалисты начинают изучать опасные вирусы, рак, инфекционные заболевания в Сухумском питомнике обезьян Всесоюзного института эндокринологии, который потом переименовывают в Институт экспериментальной патологии и терапии АМН СССР. После 1992 г. большинство специалистов и их питомцев переехали в Адлер, где история продолжается... О прошлом и настоящем уникальной научной школы мы побеседовали с прежним директором, научным руководителем НИИ МП РАН Борисом Аркадьевичем Лапиным и нынешним руководителем института Сергеем Владимировичем Орловым.



Академик Б.А. Лапин

НЕ МАРТЫШКИН ТРУД

Кабинет академика Б.А. Лапина напоминает зоологический музей: закрученные бычьи рога, чучело морской черепахи, статуэтки обезьян. Последних здесь, конечно больше всего: знаменитая «Обезьяна Дарвина», сидящая в позе «Мыслителя» Родена, три обезьяны, символизирующие собой идею недеяния зла и отрешенности от неистинного... На стенах — множество фотографий: Ю.А. Гагарин, Н.С. Хрущев, Г.К. Жуков, Н.А. Косыгин... Когда-то высокие чины охотно посещали институт, выделяли деньги на его развитие, понимая его огромное значение для современной медицины.

Сегодня первые лица не особенно балуют вниманием ученых, но мой собеседник, которому 10 августа исполнилось 98 лет, старается не акцентировать внимание на негативном.

— **Борис Аркадьевич, вспомните, как все начиналось.**

— Я попал на Медико-биологическую станцию в Сухуми в 1953 г. после окончания Второго Московского медицинского института и аспирантуры у академика И.В. Давыдовского. Это сегодня выпускники едут куда хотят, а в то время, когда я завершал обучение, нас не очень спрашивали, где мы хотим работать. Я сначала отказывался, больше хотелось заниматься хирургией. К тому же как ветеран войны, получивший тяжелое ранение на фронте, имел некие преференции. Но мне сказали: «Надо ехать в Сухуми. Там вы можете экспериментировать с обезьянами и готовить кандидатскую». Так моя семья, оставив квартиру в Москве, приехала в Сухуми. Прилетели поздно вечером, нас встретила директорская машина. Помню улицу, по которой мы двигались, и замечательный аромат от огромных цветущих деревьев. Нам предоставили две комнаты в поселке станции.

В первый же день меня встретил директор и направил на работу на северный участок в должности младшего научного сотрудника. Я создавал лабораторию патологической анатомии. Если в эксперименте или от заболеваний погибали обезьяны, я вскрывал их, анализировал, ставил диагноз и делал выводы, чтобы впредь предотвращать гибель животных. Так я проработал год и уже не мечтал о возвращении в Москву. Потом меня неожиданно вызывает директор и говорит: «Есть

приказ забрать вас из этой лаборатории и назначить заместителем директора по научной работе». В этой должности я проработал несколько лет.

РАСЦВЕТ ПИТОМНИКА В СУХУМИ ПРИШЕЛСЯ НА 1970–1980-Е ГГ. ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПОГОЛОВЬЯ ОБЕЗЬЯН БЫЛИ СОЗДАНЫ ДВА ФИЛИАЛА – В АБХАЗИИ, ВБЛИЗИ СЕЛА ТАМЫШ, И В АДЛЕРСКОМ РАЙОНЕ СОЧИ. ПОСЛЕ ТОГО КАК КОЛИЧЕСТВО ОБЕЗЬЯН ПРИБЛИЗИЛОСЬ К 10 ТЫС., ЧАСТЬ ЖИВОТНЫХ ИЗ-ЗА НЕХВАТКИ КЛЕТОК ВЫПУСТИЛИ В ЗАКАЗНИКИ, ТО ЕСТЬ В ДИКИЙ ЛЕС В СУХУМСКОМ РАЙОНЕ АБХАЗИИ, А ПОЗЖЕ – В ТУАПСИНСКОМ РАЙОНЕ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ.

— Какие направления были наиболее актуальными на Сухумской станции?

— Очень углубленно в первое время мы изучали инфекционные заболевания: дизентерию, дифтерию, сальмонеллез... Обезьяны чувствительны к подавляющему большинству патогенов человека. Они могут заболеть от них спонтанно при контактах с возбудителем, но на них можно и создавать модель инфекционного заболевания, интересующего медиков. На таких экспериментальных моделях инфекций человека можно испытывать новые вакцины и методы лечения.

Став заместителем директора по научной работе, я довел до конца создание лаборатории патологической анатомии. Вскоре была создана и лаборатория радиобиологии. В Сухуми прибыли мощные рентгенотерапевтические установки, по нашему ходатайству Институтом биофизики были сконструированы и построены два облучателя. Исследования влияния радиации представлялись важными в связи с развивавшейся тогда атомной промышленностью.

— Институт до некоторого времени оставался единственным в своем роде. Коллеги из-за рубежа часто приезжали к вам перенимать опыт?

— Очень часто приезжали американцы и европейцы. Вспоминается визит авторитетной американской делегации, в состав которой входил личный врач президента США Дуайта Эйзенхауэра и директор Национального института кардиологии в Бетесде. Последними словами руководителя делегации были: «Мы были бы счастливы иметь такую колонию в США». Позже по образу и подобию Сухумского центра стали создаваться приматологические центры за рубежом. Только в США начиная с 1962 г. было создано восемь (!) таких центров.

В одной из американских колоний содержатся человекообразные обезьяны — шимпанзе и оран-



Б.А. Лапин с детенышем шимпанзе в американском приматологическом центре

гутаны. Одно время мне хотелось создать подобную и у нас — для психологических исследований, но со временем я понял, что это слишком затратная и непростая с точки зрения этики затея. Потому для наших опытов мы остановились на низших приматах, не отличающихся особым интеллектом.

— Расскажите о самом значительном периоде ваших исследований. С чем они были связаны?

— Мы очень много занимались исследованием заболеваний сердечно-сосудистой системы, моделировали гипертоническую болезнь. Часто работы проводились совместно с американскими коллегами. Гипертоническая болезнь и коронарная недостаточность развивались у животных, как правило, в сложных экспериментах, связанных с испытанным ими стрессом. Этим болезням также способствовало содержание обезьян в индивидуальных клетках. При нахождении в большом коллективе проблем, как правило, не возникало.

— Расскажите о ваших экспедициях во Вьетнам и Африку для отлова обезьян.

— Мы часто выезжали для отлова обезьян в дикой природе. Порой командировки длились по полгода. Если во Вьетнаме нам помогали отлавливать животных местные жители, то в Нигерии, как ни пытались привлечь помощников, ничего не получилось. Помню, с вождем племени договаривались три дня, пообещали деньги, что его очень



Забияка внутри аппарата

обрадовало. Но в назначенный час на следующий день никто к нам с обезьянами так и не пришел. Пришлось все делать самим: прицеливаться в объекты «охоты» и стрелять шприцами со снотворным. Бывало, нам приходилось и убивать обезьян, чтобы посмотреть, есть патологии у представителей дикой фауны или нет.

— **Находили?**

— Нет. Все были здоровыми. Мы поняли, что условия неволи, жизнь рядом с человеком чаще приводят их к заболеваниям, таким как гипертоническая болезнь, коронарная недостаточность и инфаркт миокарда, онкология.

— **В 1970-х гг. началась работа по отбору и подготовке обезьян для космических экспериментов. Как вы отбирали претендентов?**

— Сначала мы много работали с обезьянами на Земле. Нас интересовал целый ряд моментов, который можно было изучать на обезьянах, имитируя элементы космического полета — невесомость и перегрузки. Мы возили животных на самолете в Москву в НИИ авиационной и космической медицины, который располагается в районе метро «Динамо». наших «испытателей» крутили на центрифуге, смотрели, как они реагируют, и решали, как можно смягчить патологические изменения, вызываемые космическими факторами. Кстати, на этой же центрифуге готовили и космонавтов. В частности, наши эксперименты чередовались с подготовкой женщин — претенденток на полет. Их было довольно много, и для них создавали значительные перегрузки. Физиологов беспокоил вопрос: как будет реагировать сосудистая система женщины-космонавта при переходе от состояния невесомости к тяжелым перегрузкам при посадке? В какой фазе менструального цикла целесообразно давать команду на снижение, чтобы не вызвать опасного кровотечения?

Хвостатые «дублерши» В.В. Терешковой — самки павианов-гамадрилов, испытывающие на центрифуге нагрузку в 7–8 g, — помогали нам принять правильное решение.

— **Какой вывод сделали в итоге?**

— Что женщина может лететь в космос и справляться там с перегрузками. Но все же главным вопросом была радиация, это основная проблема, которую мы изучали перед полетами первой женщины в далекие 1960-е гг. и которую изучаем сейчас.

— **Вы хорошо помните обезьян, участвовавших в проекте «Бион» с 1983 по 1997 г.? Как их выбирали?**

— Выбор пал на небольших макак из соображения снижения «полезной нагрузки» космического модуля, все-таки они в пять-шесть раз легче шимпанзе. Выбирали самых бойких самцов, поскольку они наиболее обучаемы. Всем перед полетами купировали хвосты, чтобы было плотнее и удобнее сидеть в космических креслах. Лучшие животные, по нашему мнению, — четырехлетние макаки-резусы, которым по человеческим меркам лет по 20 (вообще обезьяны живут до 30–32 лет). В этом возрасте они еще не заматерели, не стали излишне агрессивными и помещаются в созданные для них специальные кресла и костюмы.

В ПРОГРАММЕ «БИОН» ПРИНЯЛИ УЧАСТИЕ 12 МАКАК-РЕЗУСОВ. 1983 Г.: АБРЕК – БИОН; 1987 Г.: ВЕРНЫЙ – ГОРДЫЙ; 1989 Г.: ДРЕМА – ЕРОША; 1990 Г.: ЖАКОНЯ – ЗАБИЯКА; 1992 Г.: ИВАША – КРОШ; 1997 Г.: МУЛЬТИК – ЛАПИК. МУЛЬТИК ОКАЗАЛСЯ ЕДИНСТВЕННЫМ, КОМУ НЕ ПОВЕЗЛО, ПО ВОЗВРАЩЕНИИ НА ЗЕМЛЮ ОН УМЕР. ОСТАЛЬНЫЕ МАКАКИ, НЕСМОТЯ НА ТО ЧТО КАЖДОЙ НА ВРЕМЯ ПОЛЕТА ВЖИВЛЯЛИ БОЛЬШОЕ ЧИСЛО ЭЛЕКТРОДОВ (В РЕЦЕПТОРНЫЕ ВОЛОКНА ВЕСТИБУЛЯРНОГО АППАРАТА, МОЗЖЕЧОК, ГДЕ ИДЕТ ОБРАБОТКА ВЕСТИБУЛЯРНЫХ СИГНАЛОВ, В КОРУ ГОЛОВНОГО МОЗГА, В МЫШЦЫ, ВОЗЛЕ АРТЕРИИ НА ШЕЕ) ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТОТЫ СЕРДЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ДАВЛЕНИЯ, ПРИБЫВ НА ЗЕМЛЮ, БЫСТРО ВОССТАНАВЛИВАЛИСЬ И ЧУВСТВОВАЛИ СЕБЯ ХОРОШО, ДОЖИВАЯ СВОЙ ОБЕЗЬЯНИЙ ВЕК КТО В ЗООПАРКАХ, КТО В ЖИВЫХ УГОЛКАХ ШКОЛ. А КОЕ-КТО ДАЛ ЖИЗНЬ ДРУГИМ. САМЫМ ПЛОДОВИТЫМ ОКАЗАЛСЯ ГОРДЫЙ, У КОТОРОГО РОДИЛОСЬ ТРОЕ ДЕТЕЙ. У ЛАПИКА, КОТОРОГО ПОСЛЕ ПОЛЕТА «ДЛЯ РЕЛАКСАЦИИ» ПОСЕЛИЛИ С ДВУМЯ СПОКОЙНЫМИ САМОЧКАМИ, РОДИЛИСЬ ДВЕ ДОЧЕРИ.

— Кто-нибудь из хвостатых «космонавтов» еще жив?

— Самым последним полтора года назад умер от старости Лапик, который летал вместе с Мультиком на последнем «Бионе» в 1997 г. Школьники, которым мы доверили выбрать имена для наших «космонавтов», сначала назвали его Лапичным, в честь меня. Но мы сочли это не слишком этичным, и тогда дети переименовали макаку в Лапика.

— Слышала, что среди ваших питомцев были Владимир, Иосиф и Никита, названные так в честь Ленина, Сталина и Хрущева...

— Я уже не помню, в честь кого они были так названы (*улыбается*), но с этими именами возникли проблемы. Кто-то наверху связал их с конкретными историческими личностями, и нам пришла резолюция: «Переименовать». В дальнейшем с именами мы уже не экспериментировали, давали только клички в соответствии с характерами наших питомцев.

— Расскажите о переезде питомника в Адлер в 1992 г. Ваш директорский стаж к тому времени подходил уже к 34 годам.

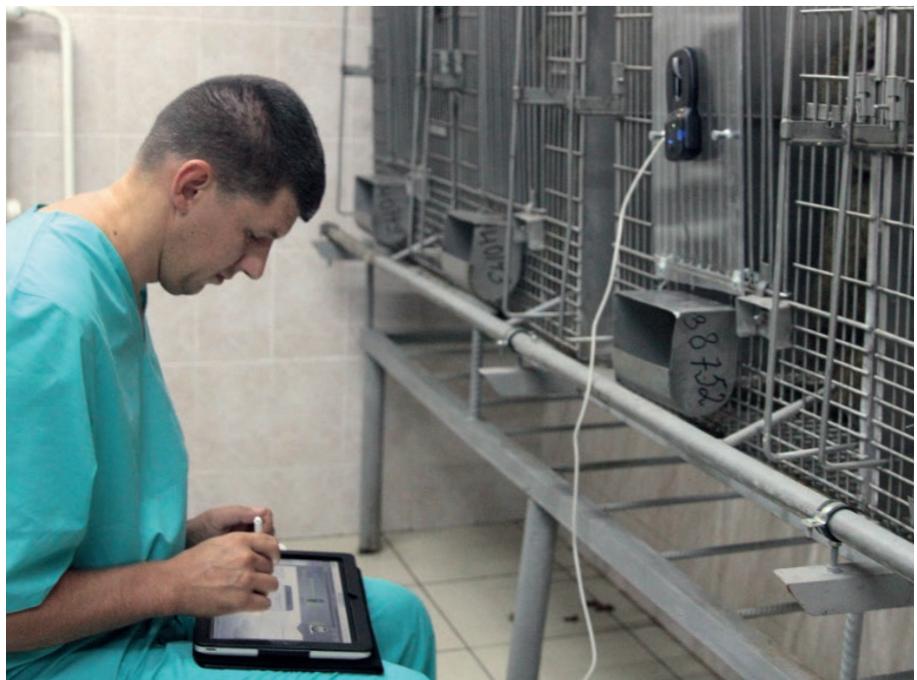
— Мне очень трудно вспоминать об этом. Говорят, что один переезд равен двум пожарам. Но, увы, предотвратить его не удалось из-за военных действий, начавшихся 28 лет назад между Грузией и Абхазией. Переезжать пришлось в филиал института под Адлером, где мы с вами сейчас и беседуем. От холода и голода обезьяны погибали. Перевезти удалось около тысячи питомцев. Большую роль в этом сыграло героическое усилие со стороны моих сотрудников, моей супруги, которая все время была рядом.

Клеток для всех перевезенных обезьян не хватало, нам пришлось выпустить часть павианов в заказнике неподалеку от Туапсе. Смотрели, как они приживутся в дикой природе. Павианы хорошо уживались с медведями и дикими кабанами, питались ягодами, дикими фруктами, зеленью и корой молодых деревьев. Помимо этого мы регулярно подкармливали их всегда в одном и том же месте брикетированной едой, которую они принимали в качестве лакомства. Заодно вели подсчет, фиксировали приплод.

Но, к сожалению, эта история закончилась, и очень своеобразно. Местное туапсинское начальство стало

выделять рядом с нашими обезьяньими угодьями участки для строительства дач. И ладно бы обезьяны не ужились с людьми — жили они спокойно, пока раздор не произошел между самими дачниками. Одна из двух повздоривших женщин набрала ведро фруктов и выложила ими дорожку из леса к участку ненавистной соседки. В итоге к той пожаловало все стадо павианов... Не только съели разложенные на земле яблоки, но и ликвидировали весь урожай на огороде и даже повредили крышу домика. Разразился скандал. Нам пришлось отловить всех и вернуть в питомник.

В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ В ПИТОМНИКЕ СОДЕРЖИТСЯ 5,5 ТЫС. ОБЕЗЬЯН, БОЛЬШУЮ ЧАСТЬ КОТОРЫХ СОСТАВЛЯЮТ РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ МАКАК (РЕЗУСОВ, ЯВАНСКИХ И ЛАПУНДЕРОВ) И ПАВИАНОВ (ГАМАДРИЛОВ И АНУБИСОВ). ИМЕЕТСЯ ТАКЖЕ ОКОЛО 150 ЗЕЛЕННЫХ МАРТЫШЕК, НЕБОЛЬШОЕ КОЛИЧЕСТВО ЮЖНОАМЕРИКАНСКИХ ОБЕЗЬЯН, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В ОСНОВНОМ ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ ТУРИСТАМ. Б.А. ЛАПИН ЗАКАНЧИВАЕТ ОЧЕРЕДНУЮ МОНОГРАФИЮ ОБ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ МЕДПРИМАТОЛОГИИ, КОТОРАЯ ДОЛЖНА ВЫЙТИ ОСЕНЬЮ ЭТОГО ГОДА.



Р.С. Овчинников настраивает работу стимулятора полового органа павиана



Член-корреспондент РАН С.В. Орлов

БЕЗ ОБЕЗЬЯН БОЛЬШУЮ НАУКУ НЕ СДЕЛАТЬ

Нынешний директор НИИ МП С.В. Орлов до приезда в Адлер в 2013 г. был практикующим хирургом в Санкт-Петербургском медицинском университете им. И.П. Павлова. Теперь ему приходится совмещать научное руководство питерской лабораторией, которая занимается поиском методов лечения онкозаболеваний, с обязанностями директора приматологического института.

— Эти два направления взаимосвязаны, — говорит С.В. Орлов, — ведь на обезьянах мы имеем возможность испытывать новейшие средства лечения рака. НИИ медицинской приматологии — уникальный научный центр. Здесь были созданы вакцины против опаснейшей болезни XX в. — полиомиелита, уносившего жизни миллионов детей, а также против кори. Недавно с участием наших питомцев специалисты разработали вакцину против лихорадки Эбола, и она уже доставлена в Африку.

Обезьяны — это лабораторный двойник человека, мы относимся к одному классу приматов, все процессы в организмах у нас схожи. Это используется для проведения экспериментов и разработки лекарственных средств. Последние годы характеризуются большим скачком в развитии области фармакологии, направленной на лечение онкологических заболеваний — бича человечества, третьих в рейтинге причин смерти.

— Для испытания лекарства вам нужна обезьяна с онкозаболеванием?

— Доклинические исследования не ставят цель проверить эффективность лекарства. Она оценивается во второй-третьей фазе испытаний, когда препарат используется у людей. На доклинической стадии определяется именно переносимость препарата. На приматах определяют возможность

применения, опасность появления аллергических реакций, токсичность, испытывают возможность введения разных доз.

— То есть вы работаете на абсолютно здоровых обезьянах?

— Да. Сами по себе они редко страдают онкозаболеваниями. Встречаются только редкие спонтанные опухоли. Таких обезьян мы тоже используем в экспериментах. Но их немного. Доклинические испытания мы проводим в среднем на 30 приматах. В частности, не так давно испытывали препарат, разработанный российской фармкомпанией «Биокад». Он обладает возможностью связывать рецепторы на лимфоцитах, которые помогают опухоли «ускользнуть» от иммунного ответа. Ей это удается за счет выделения определенного вещества, так называемого лиганда. А разрабатываемые препараты — чекпойнт-ингибиторы — как раз направлены на то, чтобы собственная иммунная система человека узнавала чужеродную опухоль и атаковала ее. Если раньше на рынке были только западные препараты для борьбы с раком, то теперь скоро появятся и отечественные, более дешевые аналоги. В 2013–2014 гг. препараты «Биокада» были первым делом испытаны здесь, в Адлере. Сегодня они уже поступают в клиники для второй и третьей фазы испытаний на эффективность.

— Вы говорите, что у обезьян редко встречается рак. Может, благодаря вашим подопечным вы уже приблизились к разгадке причин его возникновения у человека?

— Причины могут быть различными, но в основе всех клинических случаев лежит патологическая мутация. Самые первые исследования по индукции опухоли проводились профессором Н.Н. Петровым в 1940–1950-х гг. Он проводил индукцию развития опухоли костей обезьян (это было еще в Сухуми) с помощью химических и радиационных методов путем внедрения в костный мозг соответствующих агентов. Через несколько лет у обезьян развивались мутация и остеосаркома. Много проводилось экспериментов, направленных на изучение вирусной природы рака. Учеными Л.А. Зильбером и академиком Б.А. Лапиным были смоделированы искусственные лимфомы. Исследования продолжаются и сейчас, но до разгадки лечения онкозаболеваний еще далеко.

— Слышала, что у вас в институте не так давно был создан препарат от краснухи на основе штамма «Орлов». Его называли в ващу честь?

— Нет. В честь мальчика, который болел краснухой, чей биоматериал был использован для создания вакцины. Мы испытывали ее на наших обезьянах. У них был такой же иммунный ответ, какой после возникал и у человека. Таким же образом мы создали вакцины от кори и полиомиелита, вирусного гепатита. За границей, например, проводится работа по созданию вакцины против СПИДа.

— **Биоматериал обезьян используется в вашем институте для создания вакцин?**

— У нас — нет. На них мы проводим только эксперименты с готовыми препаратами.

— **Имеется ли у вас все необходимое для работы с вирусами, опасными для жизни исследователей?**

— Для испытания наиболее опасных вакцин, например против вируса Эболы, мы вывозим наших обезьян в крупные специализированные научные центры. Работа с опасными веществами проводится на предприятии «Вектор» в Новосибирске, в НИИ вакцин и сывороток им. И.И. Мечникова в Москве, в ряде организаций военного назначения, которые обладают специальными боксами высокой степени защиты.

— **Естественно, вы работаете в соответствии с международными правилами этики? В чем они заключаются?**

— Сформулированные еще в конце 1950-х гг., они основаны на трех R.

Первое — это *replacement*, замещение. Там, где можно заменить обезьян другими видами животных, надо заменять. У нас нет человекообразных обезьян. Даже те, кто использовал таковых раньше (это некоторые американские приматологические центры), сейчас не привлекают их к своим опытам. В нашем институте — только низшие приматы:

макаки (резусы, яванские и лапундеры), павианы (гамадрилы и анубисы) и зеленые мартышки.

Второе — *reduction*, редукция, то есть максимальное уменьшение количества животных в экспериментальной группе.

Третье — *refinement*, улучшение самого опыта, то есть уменьшение страданий обезьян, проведение экспериментов максимально гуманными методами, под наркозом. Мы стараемся использовать наших питомцев только для самых жизненно важных экспериментов.

С помощью приматов получено около десяти (!) Нобелевских премий. Это тот объект, без которого большую науку не сделать. И мы стараемся в благодарности максимально скрасить их жизнь. В условиях просторных вольеров со сбалансированными кормами, фруктами и зеленью обезьяны чувствуют себя вполне комфортно. В основном все проживают свой обезьяний век по максимуму — до 30–35 лет, что редко бывает в природе.

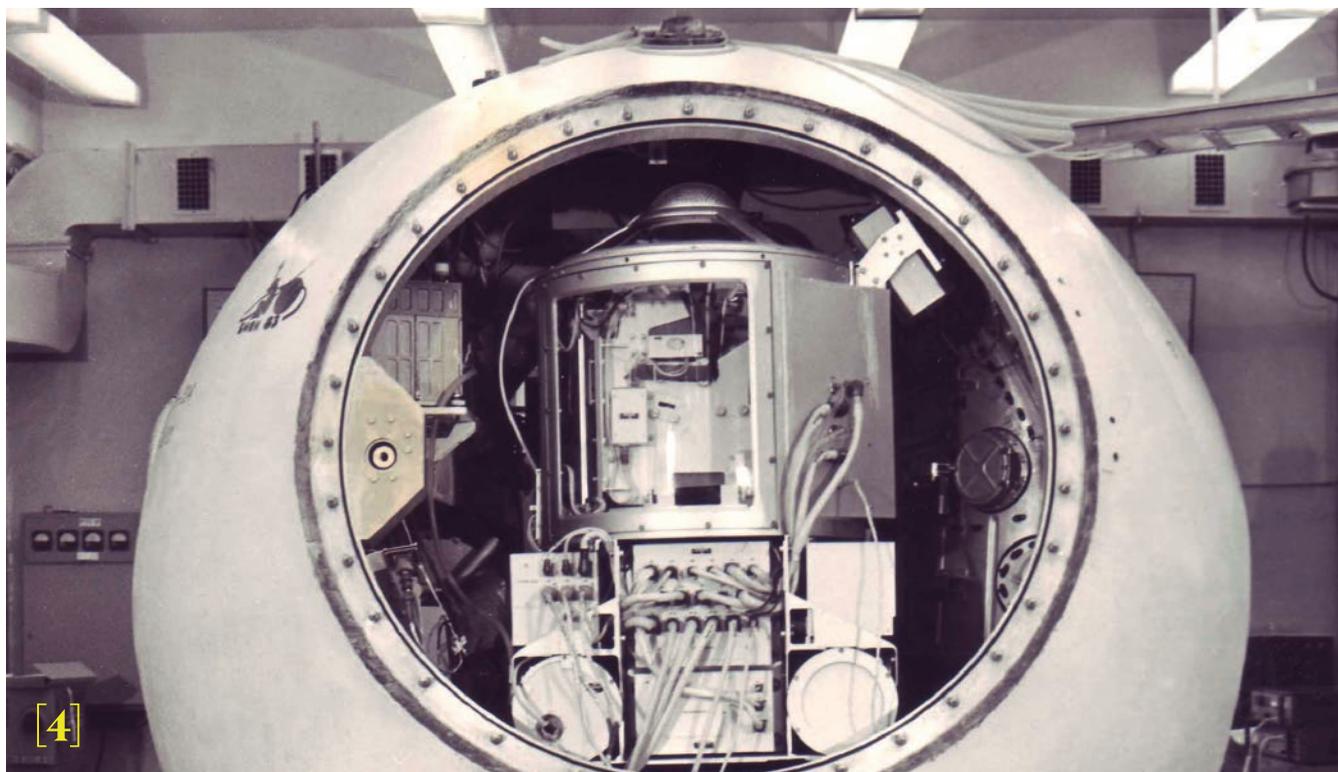
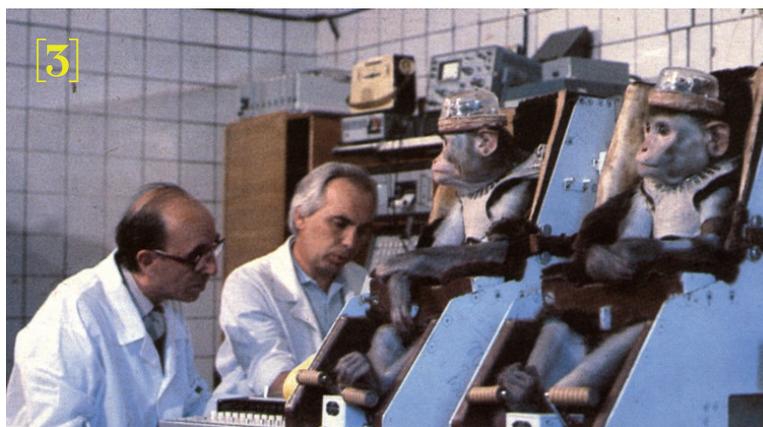
— **Целесообразность использования отечественных вакцин определяется только стоимостью?**

— В первую очередь, своя вакцина — это безопасность страны. Представьте, что какие-то поставщики из-за рубежа, на которых мы полагались, вдруг перестанут поставлять ее в нашу страну. Этот жизненно важный препарат — прямой



Директор института знакомит со своими питомцами президента РАН А.М. Сергеева

1. Физиолог ИМБП РАН И.Б. Козловская с космонавтами Дремой и Ерошей
2. Б.А. Лапин (слева) и О.Г. Газенко со своими питомцами
3. О.Г. Газенко (слева) готовит обезьян к полету в космос
4. Первый космический корабль обезьян «Бион», 1983 г.



политический элемент воздействия. И мы должны иметь возможность произвести свои препараты в своей стране. Это касается не только вакцин, но и всех других фармпрепаратов. В социалистическом лагере основные производства лекарств были размещены в Венгрии и Болгарии, а потому после развала системы взаимоотношений в 1990-е гг. наша фармпромышленность оказалась в плачевном состоянии. Но за последние 20 лет у нас появились свои производители.

— Для борьбы с какими болезнями мы пока не имеем своей вакцины?

— У нас есть почти все виды вакцин. Даже при том что некоторые еще импортируем, мы имеем возможность хоть завтра начать их производство у себя. Что же касается вакцины от полиомиелита, наша страна уже экспортирует ее в Европу.

— Расскажите о международных проектах, которые осуществляются в вашем институте.

— Начну с нашего сотрудничества с партнерами из Высшей медицинской школы в Ганновере. Оно длится с 1994 г., когда здесь начались первые эксперименты по трансплантации органов. Была целая серия экспериментов по созданию органов на основе децеллюляризации (очистки трупного органа от существовавших на нем клеток). Для этого брали трупный орган — трахею, пищевод, сердечный клапан — и с помощью специальной методики удаляли с него клеточный состав. Оставшийся каркас, на котором уже не было антигенов, засеивали стволовыми клетками донора и пересаживали в организм. Такие работы активно ведутся и сейчас на сердечных клапанах. В Германии подобные трупные каркасы уже 15 лет используются в клиниках. У нас же мы планируем сделать подобное только в этом году. Внедрим сначала в обезьян, а потом передадим методику в клинику. Мы сотрудничаем с хирургами краснодарской больницы, специализирующихся на трансплантации органов. Во всем мире очередь на донорские органы на порядок превышает возможности клиник. Создание альтернативных вещей, таких как искусственные органы на основе биологических скаффолдов (матриц), поможет эту очередь существенно уменьшить. Кроме биологических матриц мы используем также синтетические каркасы НИЦ «Курчатовский институт», тоже засеиваем их стволовыми клетками и на разных этапах наблюдаем, как они приживаются. Подшиваем их подкожно и в артерии обезьянам и смотрим, какой способ подготовки лучше, отработываем методики для удаления антигенов. Сегодня в большинстве операций по замене клапанов сердца используются клапаны свиней. Так вот их антиген альфагал часто не дает приживаться клапану, и удалить его не получается никакими способами. У пожилых людей, у которых иммунная система работает хуже, они еще функционируют, а у молодых

быстро отторгаются. Поэтому создание клапанов с подсаженными собственными клеткам пациента очень перспективно.

— Сколько нужно времени, чтобы каркас оброс стволовыми клетками?

— Процесс засеивания длится сутки-двое. После, попав в организм, они сами начинают развиваться в нужном направлении.

— Какие результаты получили ваши германские коллеги, работающие с подобными методами?

— К настоящему времени пересажено около 400 сердечных клапанов умерших людей. Есть ряд пациентов, которые уже родили детей. Кстати, эти клапаны с родными стволовыми клетками пациента могут расти, если были подсажены ребенку, вместе с ним.

— Какие еще органы можно пересаживать при помощи вашей методики?

— Трахеи, пищевод, сосуды. В перспективе можно децеллюляризовать целое сердце или легкое. Но это пока находится на ранних стадиях экспериментальной работы.

— Слышала о ваших уникальных исследованиях возможности возвращать мужчинам утерянные в результате ряда заболеваний половые функции...

— Эти исследования уже находятся на стадии передачи в клинику. Работа ведется с нашими российскими спонсорами — компанией «Ростагроэкспорт». Инициатором был Б.Ю. Александров, бывший врач, бизнесмен, который финансировал эту работу на протяжении последних двух лет.

Смысл методик в том, чтобы с помощью новейших технологий, основанных на применении электрических импульсов, стимулировать определенные нервы, которые проходят в тазу у обезьян, и вызывать с помощью этой стимуляции эрекцию. Это направлено на решение проблемы пациентов после радикальных операций на предстательной железе. В настоящее время доклинический этап испытаний полностью завершен, изучена анатомия, отработано подкожное вживление стимулятора. Стимулятор — это прибор, который работает по принципу водителя ритма, кардиостимулятора. Конечно, тут есть свои нюансы — у обезьяны другая анатомия, иной тип прохождения нервных пучков, отсутствие жировой клетчатки в малом тазу (у человека она присутствует и мешает проводимости электрических сигналов). Тем не менее экспериментальная часть работы завершена, операции по отработке различных режимов и перспективы применения в клинике идут каждый месяц.

— Почему на Западе до сих пор никто не додумался до такого?

— Запад начал работать в этом направлении лет 20 назад, но с появлением виагры и ее аналогов исследования были заброшены.

— **Так за чем же будущее, по-вашему?**

— У каждого варианта есть свои плюсы и минусы. У той же виагры есть ряд противопоказаний, например для больных с сердечно-сосудистыми заболеваниями. У некоторых наше устройство не будет работать в силу анатомических особенностей. Поэтому мы считаем, что стоит рассматривать возможности использования обоих методов либо по отдельности, либо в сочетании.

— **Вы хотели бы клонировать обезьян, если бы это было разрешено в нашей стране?**

— Мы планируем такие работы, но не совсем по клонированию, а по созданию вариантов с элементами человеческих органов, которые мы могли бы использовать для исследования, как модель. Мы ведем переговоры с рядом научных фондов, заинтересованных в этой работе. Естественно, на первых порах работа будет заключаться в пересадке органов от обезьяны к обезьяне. Возможно, испытаем возможность редактирования генома.

— **Как это будет происходить?**

— Берется донорская яйцеклетка, оплодотворяется *in vitro*, в появившийся эмбрион вносятся изменения по принципу генной инженерии, чтобы появившийся детеныш был с заданными свойствами. Какими? Например, без того или иного наследственного заболевания. За рубежом такие эксперименты проводятся очень активно. Да и в России наверняка тоже проводятся, но о них пока не говорят.

— **В вашем институте изучаются и поведенческие особенности обезьян. Расскажите о самых интересных их аспектах.**

— Обезьяны очень сильно отличаются друг от друга, у каждого вида свои особенности. Мы их изучаем на павианах гамадрилах, которые считаются самыми высокоорганизованными из низших приматов. Исследовать поведенческие аспекты в их жизни можно так же, как и в человеческом социуме. В каждом вольере есть глава семейства — альфа-самец, который первым подходит к кормушке, но и в случае опасности первым принимает бой, моментально встает между самкой с детенышем и возможным агрессором. Есть работы с так называемыми депривированными обезьянами, лишенными матери в раннем возрасте. В других экспериментах мы сначала обучаем обезьян определенным навыкам, потом воздействуем на них некоторыми неблагоприятными факторами, а после смотрим, как эти навыки восстанавливаются. Подобное исследование связано с подготовкой полета на Марс.

— **Очень интересно, расскажите об этом подробнее.**

— Нам известно, что при полете на Марс космонавты будут подвергаться воздействию опасных космических лучей. Есть предположение, что здоровыми они на Красную планету не долетят, мозг будет поражен. Мы должны проверить эту версию. Для этого был выдан грант РФФИ сразу на три

института: наш, Институт медико-биологических проблем и ОИЯИ в Дубне. Именно в Дубну мы возили в прошлом году своих питомцев, шесть обученных навыкам обезьян, чтобы облучать их, моделируя условия полета. Сейчас они возвращены в Адлер, сидят в изоляторе, мы за ними наблюдаем. Пока явных изменений в поведении не замечаем, навыки они не забыли, но не исключено, что последствия «полета» могут сказаться не сразу.

— **Они облучались в течение 500 дней?**

— Это нереально. Было лишь несколько сеансов, но доза, которую они получили за время их поведения, сопоставима с той, что могли получить за весь полет. Мы предполагаем, что у облученных обезьян могут раньше обычного наступить старческие изменения мозга, например деменция.

— **Она свойственна и обезьянам?**

— Конечно. Как я уже говорил в самом начале, обезьяны очень похожи на людей и у них наблюдаются схожие процессы. Не так давно у нас была создана лаборатория для изучения проблем, связанных с мозговой деятельностью. На обезьянах можно моделировать паркинсонизм и другие нейродегенеративные заболевания.

— **Как обстоят дела с воспроизводством животных?**

— Они неплохо рождаются в неволе. До 2015 г. у нас насчитывалось 4,5 тыс. голов. Ежегодный приплод составлял около 500 обезьян. А после того как в 2015 г. мы построили 44 новых вольера, у нас случился беби-бум. Ежегодно обезьянье стадо увеличивается на 900–1000 голов. По большинству видов мы закрываем потребности. Но ряд видов, например макака яванская крабоед, которая активно используется для испытаний лекарств, требуется в больших количествах. Частично мы привозим их из Вьетнама, по 100–200 в год. Это количество необходимо не только для экспериментов, но и для пополнения стада «новой кровью», что помогает бороться с инбридингом (скрещиванием родственных форм в пределах одной популяции, которое приводит к ослаблению иммунной системы).

Строительство новых вольеров, лабораторий, операционных, закупка обезьян... Институту медицинской приматологии очень нужны деньги. Научная организация еще жива во многом благодаря хозрасчетной деятельности, которая позволяет покрывать минимальные расходы на корма, лекарства, необходимый уход за питомцами. Для прорыва и возвращения прежних лидирующих позиций требуется гораздо больше: чтобы развернуть полноценные исследования мозга, необходимы компьютерный томограф и магнитно-резонансный томограф, ангиограф, полногеномный секвенатор и другое современное оборудование. ■

Беседовала Наталья Веденева



ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛ

Научная Россия



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

КАК ЖИВОТНЫЕ

ПРИНИМАЮТ



РЕШЕНИЯ

На фото:
наземная улитка
Helix lucorum



Принимать решения на том или ином уровне приходится не только человеку, но и практически любому животному — от беспозвоночных до млекопитающих. Однако свидетельствует ли это о наличии сознания? Как вообще можно определить понятия «сознание», «интеллект» применительно к животному миру? Об этом интервью с доктором биологических наук, членом-корреспондентом РАН, директором Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН (2005–2018) Павлом Милославовичем Балабаном.

— Я не люблю употреблять термин «сознание», потому что для него на данный момент нет точного определения. Если оно появится и будет принято всеми, тогда мы сможем проверить экспериментально, есть сознание или нет. Тем не менее применительно к животным мы сегодня можем оперировать довольно четкими понятиями: эмоции, память, способность к обучению, принятию решений.

Сейчас никто не сомневается в том, что животные способны принимать решения, передавать информацию. Даже пчела прилетает к другим пчелам, что-то показывает, и все они летят прямо к источнику пищи. Можно сказать, что пчелы приняли решение лететь в определенном направлении.

— **Что же означает «принятие решения» применительно к беспозвоночным и каков его механизм?**

— Существует определенный класс нейронов — нейроны, принимающие решения (*decision neurons*), или командные нейроны. У беспозвоночных они называются командными, потому что действительно «командуют» несколькими сотнями других нейронов, называемых мотонейронами. И если мы замечаем активацию командного нейрона, то за этим последует совершенно конкретное поведение. Например, командные нейроны у рака были впервые описаны в 1950-е гг., они определяют всем известные случаи, когда рак начинает быстро уплывать хвостом вперед.

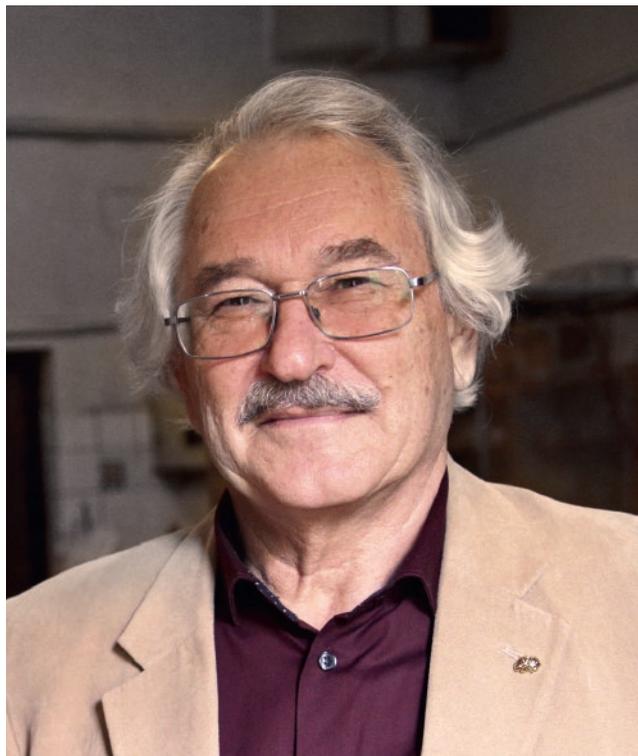
Улитки наша группа обнаружила аналогичные командные нейроны, у них генерация всего нескольких потенциалов действия вызывает втягивание щупалец, и улитка прячется в раковину — ее стандартная реакция почти на любой стимул.

Или, например, у рыбки тоже обнаружены командные нейроны, определяющие принятие решения: когда сбоку от нее проплывает хищник, она делает определенное движение — резко перемещается на другую траекторию движения, и хищник промахивается.

У позвоночных этот принцип, естественно, тоже работает. У высших позвоночных, млекопитающих, эти командные нейроны очень хорошо показаны в контроле движения глаз. Есть такие нейроны, которые активируются до того, как глаза начнут двигаться, то есть они принимают решение, и точно будет саккада — быстрое, точно согласованное движение глаз.

— **Действительно ли это принятие решений? Или просто заданная программа на уровне некоего генетически запрограммированного рефлекса?**

— Конечно, это программа, и она обусловлена различными механизмами, включая молекулярные. Но она либо включается, либо не включается. Существуют элементы, паттерны активности сети, которые предупреждают: «Программа сейчас включится» — и включают ее, или «Она не включится» — и нет запуска.



Член-корреспондент РАН П.М. Балабан

Понятие «принятие решения», конечно, условное; по сути, это преодоление порога. Но при системных процессах, характеризующих поведение, действуют нейроны, которые конкретно представляют собой пороговые элементы. И если они по любой причине сработали, а у них очень много разных модальностей, это вызовет определенное поведение.

Важно отметить, что подобные механизмы характерны только для нервной клетки. Ни в одном другом типе клеток этого нет, там есть мембранный потенциал, а импульса не может быть, потому что действуют другие каналы. А в нервной клетке каждый раз принимается решение: возбуждение достигло порога — сработало, и в сеть посылается информация, не достигло — не сработало.

— Насколько я знаю, ваша кандидатская диссертация, написанная еще в 1970-е гг., так и называлась: «Принципы принятия решений в нервной системе у беспозвоночных». Вы уже более 40 лет в этой теме, и основная ваша модель — улитка. Почему? Что в ней удивительного?

— Моя история в науке началась, когда я пришел к своему научному руководителю — выдающемуся биологу Е.Н. Соколову — и сказал: «Вы мне дали задание простимулировать нейроны улитки и изучить реакцию. Я все время наблюдаю: у мотонейронов всегда есть активность и происходят какие-то сокращения мышц, а сенсорные нейроны молчат и ждут стимула, ничего не происходит. При этом мы обнаружили несколько интернейронов,

и если их активировать, происходит целостная поведенческая реакция — улитка втягивает щупальца. И это одиночные нейроны!» Он был в шоке, честное слово...

— Это было открытие?

— Можно так сказать. Считалось, что роль одного нейрона очень мала. Мы стали подробно обсуждать этот эксперимент, и Евгений Николаевич вспомнил гипотезу командных нейронов: что где-то в линейной цепочке нейронов должен быть центр принятия решений — комбинация нейронов или отдельный нейрон. Мы начали проверять эту гипотезу. Сейчас это уже давно не гипотеза — существование командных нейронов, или нейронов, принимающих решения, доказано. У позвоночных это уже не отдельные нейроны, а целые кластеры. Да и у некоторых беспозвоночных тоже — например, у улитки девять таких нейронов. Оказалось, что это достаточно универсальный принцип управления. Поэтому со способностью и механизмами принятия решений животными ученые более или менее разобрались. А вот с эмоциями гораздо сложнее.

— Несколько десятилетий назад спорили о том, есть ли у животных эмоции в нашем понимании. Но сейчас, мне кажется, с этим уже никто не спорит.

— В 1980-е гг. директором нашего института был академик П.В. Симонов, который занимался именно этой проблемой. Мы с ним часто разговаривали, и я как-то спросил: «Павел Васильевич, а что мы могли бы на беспозвоночных, на улитках сделать интересного в этом плане?» И он сразу ответил (видимо, много думал об этом): «Докажите, есть ли у них эмоции». Это тот же вопрос, который задает и Далай-лама (наличие эмоций у животных — важная часть концепции буддизма).

— А как мы определим эмоции? Дайте ваше определение.

— Вот! Я то же самое сказал Павлу Васильевичу: «Дайте определение эмоций, и я тогда попробую».

Он развивал теорию эмоций в 1960–1970-х гг. и вывел определение-формулу, согласно которой эмоция есть отражение мозгом человека и животных какой-либо актуальной потребности (ее качества и величины) и вероятности (возможности) ее удовлетворения, которую мозг оценивает на основе генетического и ранее приобретенного индивидуального опыта. То есть поведение живых существ направлено к минимизации воздействий, способных вызвать отрицательные эмоции, и к максимизации положительных эмоциональных состояний.

Но это касалось в основном высших животных, а как выражаются эмоции у беспозвоночных? Мы упростили это понятие до уровня «нравится — не нравится»: если нравится, то животное стремится повторить определенное движение, действие

или какое-то поведение, а если не нравится, то после первого опыта повтора не происходит. У простых видов это можно определить по приближению к источнику чего-то или удалению от него.

Сейчас так обучают червячков *Caenorhabditis elegans*: им в чашку Петри капают некий концентрированный химический градиент, и если он им нравится, червячки перемещаются к нему, а если нет — остаются на месте или, наоборот, удаляются. Основная проблема в том, что чаще всего эти запахи или любые воздействия связаны с какими-то физиологическими потребностями. Например, голодное животное отправится в сторону пищи, и это никак не связано с эмоциями. Это мы и обсудили с академиком П.В. Симоновым, и он сказал, что единственный критерий эмоционального поведения, который мы можем задействовать, — это феномен самостимуляции. Если вы поместите электрод в определенную зону мозга животного и дадите животному возможность самому подавать туда стимуляцию, совершая определенное движение, тогда, если центр удовольствия существует, животное будет стремиться повторять и повторять это действие.

На крысах это было замечательно показано канадскими нейробиологами Джеймсом Олдсом и Питером Милнером еще в 1957 г.. Они обнаружили, что электростимуляция рострального гипоталамуса (центра удовольствия) у крыс может выступать в качестве награды за поведенческие действия. Эта работа стала классической и оказала влияние на множество исследований в области нейробиологии обучения и памяти.

После этого многие исследователи работали с крысами: центр удовольствия — гипоталамус, центры неудовольствия тоже хорошо известны. Один раз крыса нажмет на педаль и уже больше никогда к ней не приблизится, потому что неприятно. И, наоборот, воздействуя на центр удовольствия (как оказалось, их в мозге несколько), животное забывает о питье и еде — сидит и нажимает на педаль. Это показатель того, что у животных существуют эмоции, которые могут быть выше голода и жажды.

— Но крысы все-таки животные очень высокого уровня организации. А как показать данное свойство у беспозвоночных, у рыб?

— Начну с предыстории. В 1980-е гг. я некоторое время работал в Канаде в том самом университете, где совершили свое открытие Олдс и Милнер. И Питер Милнер, первооткрыватель самостимуляции, пришел на мою лекцию! После лекции я поделился с ним идеей провести подобный эксперимент на улитках, и он согласился. Под его надзором мы за два месяца сделали работу, которая была (и до сих пор остается) единственным исследованием на беспозвоночных с самостимуляцией центров удовольствия.

Нам удалось вживить улитке электрод, вывести разъем и замкнуть цепь таким образом, что когда животное прикасалось головой к определенному устройству — педальке, оно получало импульс. Оказалось, что если вживить эти электроды в центр, связанный с размножением, то она будет вести себя в эксперименте точно так же, как крыса, — повторять это движение снова и снова. А если вживить электрод буквально в соседнюю часть мозга — ганглий, который связан с негативными, болевыми ощущениями, то улитка один раз дотронется до педальки и больше к ней не прикоснется. То есть у беспозвоночных тоже есть центры, которые можно назвать центрами удовольствия. Потом оказалось, что в нейронах этих центров вырабатываются энкефалины — опиоидные нейропептиды, обладающие морфиноподобным действием. Это можно было бы предположить, но мы обнаружили их случайно, и потом, когда начали специально исследовать, где экспрессируются эти эндогенные морфины, оказалось, что именно в центре, связанном с половым размножением.

— Сколько подобных нейронов у улитки?

— Двести. И это совсем немного — из 20 тыс. основных нейронов. Это небольшая область. Известно, где она расположена, и всегда было известно, что она связана именно с размножением. По морфологии она иннервирует в том числе и половые органы. Кстати, наши эксперименты были повторены в Аргентине на крабах.

— Но можно ли это назвать эмоцией?

— А почему нет? Если животное стремится повторять какое-то ощущение снова и снова, значит это ощущение, если оно не связано с определенными физиологическими потребностями, доставляет ему удовольствие. Ему это просто нравится. Это — эмоция. А в соседней области, где как раз расположены командные нейроны оборонительного поведения (куда мы тоже, естественно, вживили электроды), она один раз получает стимул и все — больше ей не нужно, улитка активно пытается обойти это препятствие — «ложится на другой курс».

— Но это же просто реакция на боль...

— Это не боль, болевые рецепторы расположены отдельно. Здесь действуют не ноцицептивные нейроны (рецепторы боли), а совсем другой вид нейронов — интернейроны, которые как раз участвуют в принятии решения об оборонительном поведении — отдергивании, остановке, уходе от объекта. А в половом поведении нейроны как раз принимают решения и заставляют организм двигаться к объекту — они же должны встретиться в природе.

Действительно, отделить эмоции от физиологических потребностей очень сложно. Эмоции — тоже физиологическая потребность любого организма: они всем нам нужны, причем желательно позитивные. До сих пор нет полного понимания

механизмов эмоций, нейронной сети, которая формирует их у беспозвоночных. Похоже, это больше связано с выделением гормонов, тех же энкефалинов, с балансом серотонина и дофамина.

Позже мы провели исследования на беспозвоночных по действию каннабиноидов (марихуаны), и оказалось, что эти вещества также участвуют в организации поведения животного, но совершенно на другом уровне. Это тоже в каком-то смысле эксклюзивная работа, потому что существует не так много исследований беспозвоночных, связанных с высшими формами поведения. Нам удалось показать, что каннабиноиды действительно присутствуют в нервной системе беспозвоночных (как и у нас

с вами), они продуцируются, но вступают в действие только в тех случаях, когда происходит очень сильная активация нервной системы. Вот тогда они выделяются и выполняют тормозящее, охранительное действие, чтобы не было перевозбуждения.

— Сейчас вы занимаетесь в основном исследованиями памяти у беспозвоночных. Почему вы перешли от эмоций к памяти?

— С памятью значительно легче работать, потому что в эксперименте ее сравнительно просто определить, на нее можно оказывать определенные воздействия, ее можно регулировать. Например, с подачи члена-корреспондента РАН К.В. Анохина, руководителя лаборатории нейрофизиологии памяти НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина, в нашем институте были проведены исследования по «стиранию памяти» у беспозвоночных. Нам удалось не только добиться результата, но и показать механизм.

Оказалось, что если сделать животному напоминание (провести активацию или реактивацию памяти) на фоне блокады синтеза новых белков, то на следующий день эта память исчезает. Исчезает именно та информация, которую «напомнили» в тот момент, а остальная память сохраняется. Животное не помнит, что его били током в определенном месте или был какой-то неприятный звук, подкрепляемый током, или неприятный запах и т.д., — память исчезает.

Мы начали этим заниматься с начала 2000-х гг., и тогда не понимали, почему стирание памяти происходит именно при напоминании, если в этот момент блокировать синтез новых белков, и при каких еще условиях это может происходить. Как выяснилось, эти условия всем известны. Знаете, когда происходит амнезия? Например, человек получил удар по голове и впоследствии не помнит, что происходило за два часа перед ударом. Удар вызывает

выброс многих нейромедиаторов, производство оксида азота (известно, что при черепно-мозговой травме выделяется большое количество оксида азота в нервной системе) — и на следующий день памяти нет. Мы не знали про оксид азота, но посмотрели, каким образом это происходит, пошли к биохимикам и спросили: понятно, что формирование памяти зависит от новых белков, а что делать, если нужно быстро разрушить эти белки, не обязательно до конца, а просто изменить их функцию? Ответ был такой: только одним способом — добавить в среду оксид азота. У нас как раз в конце 1990-х гг. вышла работа по NO-синтезирующим нейронам на млекопитающих. Все знали, что оксид

азота образуется, но не понимали зачем. Это свободный радикал, и считалось, что он действует в качестве сигнала для соседних клеток. Правда, оказалось, что он существует всего секунды, очень быстро метаболизируется и исчезает.

И тогда мы внимательно посмотрели, что происходит в синапсе, изменения в котором служат основой для формирования какого-то следа памяти. Итак, мы повторили на улитках все эксперименты, которые были сделаны К.В. Анохиным на цыплятах, потом на крысах. Реактивировали память, блокировали синтез белка и наблюдали, как на следующий день память исчезает. Причем у нашей модели — улитки — очень удачная и достаточно простая поведенческая ситуация: можно количественно измерить (!), что память исчезла полностью. Именно не уменьшилась или увеличилась, а исчезла!

Мы сделали следующий шаг и в эксперименте во время напоминания и блокирования синтеза ключевых белков одновременно блокировали и синтез оксида азота. Оказалось, что в этом случае стирания памяти не происходит. Этот феномен доказывает, что оксид азота совершенно точно участвует в исчезновении памяти. Мы опубликовали результаты исследований в международных журналах в 2014–2016 гг.

Подытожу: избирательная, ассоциативная память (в данном случае память на обстановку, когда животное получало воздействие током) полностью исчезала, если блокировать синтез белка. И, наоборот, она сохранялась, тоже полностью, если одновременно с блокировкой синтеза белка еще блокировать и синтез азота. То есть нам фактически удалось натолкнуться на химический механизм стирания и сохранения памяти. Молекулярный механизм оказался достаточно простым, потому что фермент, который производит оксид азота,

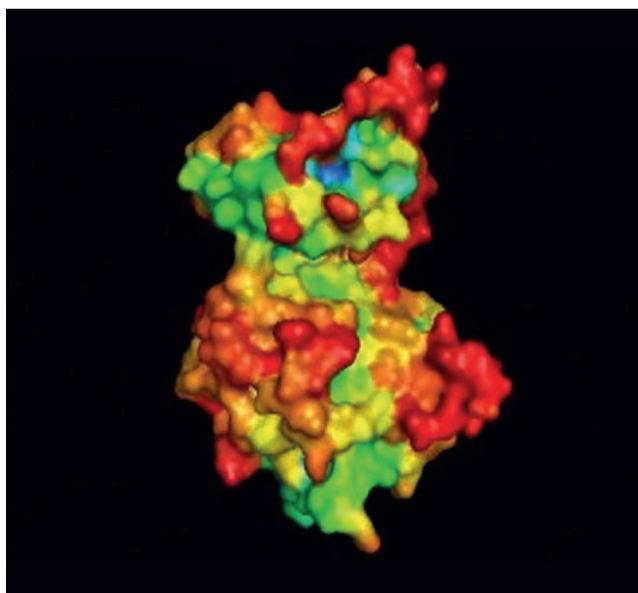
Геном получен от родителей, и какие гены у нас есть, такие и есть. Но уровень их экспрессии регулируется в течение всей нашей жизни

прямо сцеплен с белками постсинаптической мембраны, одним из основных рецепторов, который пропускает кальций, и первое, что активируется кальцием, — оксид азота. Дальше оксид азота связывается со всеми белковыми молекулами, расположенными рядом. А рядом располагается один из ферментов, который управляет эффективностью работы синапса — протеинкиназа М-зета (РКМ ζ), которая формируется именно там и нигде больше не задействована. А на что может действовать оксид азота? Как раз на РКМ ζ — это и есть механизм пластичности нервной системы, стирания памяти. Так мы постепенно перешли в нашей работе на следующий уровень.

— В чем он состоит?

— Он связан с обучением. Я рассказал о молекулярных механизмах работы синаптической связи — с моей точки зрения, они очень красивы. Но роль одного синапса не просто ничтожна, она вообще не видна, потому что в нервной системе одного человека синапсов больше, чем звезд в галактике. У каждого нейрона около 10 тыс. синапсов, и даже если 100 из них изменятся, в процентном соотношении это очень мало.

Существует совершенно другой уровень регуляции. Можно провести такую аналогию: есть миллионы солдат, без них война не происходит, но управляют ими в другом месте, в штабе. Оказалось, что у нервной системы, у нервной клетки механизм управления (как и ожидалось) находится в ядре. За последнее время были обнаружены довольно простые регуляторы работы нервной клетки, которые одновременно могут (из штаба) регулировать практически все синапсы или большую их часть.



Модель структуры протеин-киназы М-зета, которая необходима для хранения долговременной памяти

Но это не генетические механизмы. Почему? Потому что при формировании памяти наш геном не меняется, и это точно известно. Геном получен от родителей, и какие гены у нас есть, такие и есть. Но уровень их экспрессии, работы меняется очень сильно. Он регулируется в течение всей нашей жизни, и при формировании памяти это один из этапов регуляции эффективности работы генетической системы в каждом нейроне. Каждый нейрон имеет свою особенность, у каждого есть свой профиль, паттерн экспрессии генов. Что отличает клетку кожи, которая имеет такой же геном, что и нервная клетка? У клетки кожи работает около 8% генов, а в нервных клетках — до 80%. Если усилить или подавить их экспрессию, изменив, например, баланс генов, отвечающих на образование серотонина, мы получим совершенно другую клетку.

Для меня сейчас самый большой научный интерес — управление эпигенетическим механизмом. Первые результаты в этом направлении нас поразили — они касаются обучения. Из 100 животных, которых мы обучаем, в среднем 15–20% ничему не учатся, и это норма в данных условиях. Обычно, если провести аналогию со школой, их называют «плохими учениками». Мы их просто отставляем в сторону: ну, не учатся, по каким-то причинам у них плохие показатели — или гормональные, или есть предыстория (улитка упала и ушиблась). В этом году у нас было мало животных, и около 60 оказались «плохими учениками».

— Мы ведь сейчас об улитках говорим?

— Да, об улитках. И мы ввели этим «плохим ученикам» вещества, активирующие экспрессию генов, — эпигенетические регуляторы, влияющие на различные когнитивные функции иногда позитивно, иногда негативно. Это довольно простые вещества, которые попадают напрямую в ядро клетки и управляют экспрессией генов обычными химическими реакциями: ацетилизацией, метилированием и т.д. Оказалось, что однократное введение «плохим ученикам» такого регулятора всего на 30 минут (до этого животных безуспешно тренировали в течение десяти дней) способствовало тому, что на следующий день у них резко улучшалась память. Видимо, прежде память у них просто не могла закрепиться.

Тогда мы продолжили эксперимент и ввели тот же эпигенетический регулятор «хорошим ученикам». Нас ждало разочарование — у них ничего не происходило, а у некоторых память даже несколько ухудшилась. Это очень важный результат, который показывает, что мы не можем бесконечно улучшать свою память и способности и что существует определенный максимум.

Сейчас мы пытаемся понять, как происходит эта регуляция. Скорее всего, она может быть применима и к хранению памяти. То есть если мы

открываем окно для эпигенетической регуляции, память можно изменить. Только в эти моменты может действовать в том числе и оксид азота. Мы знаем, что для консолидации, реконсолидации памяти нужно всего четыре часа, а потом, что бы вы ни делали, какие бы блокаторы ни применяли — ничего не поможет. А вот возможность ее изменения, похоже, открывается как раз с помощью этих эпигенетических регуляторов.

— Объясните, пожалуйста, наглядно механизм действия этих регуляторов.

— Они дают возможность изменить уровень экспрессии данного гена. Вот есть определенный уровень экспрессии — производится 100 молекул. Есть эпигенетический регулятор, который повышает экспрессию, и есть другой, который понижает. Например, вместо обычных 100 молекул благодаря действию регулятора будет производиться 200 молекул, предположим, серотонина, что в корне изменит состояние организма. Если это понижающий экспрессию регулятор, будет 50 молекул — вообще получится другой организм. Но такие возможности открываются только на время действия регуляторов — небольшой промежуток времени: десятки минут, часы.

— А если вместо эпигенетического регулятора вы введете либо дополнительный серотонин, либо, наоборот, какое-то вещество, блокирующее его образование, — получится то же самое или нет?

— Мы недавно отправили в печать статью как раз на эту тему. В одном случае мы заблокировали серотонин и память исчезла. А в другом — искусственно увеличили его синтез, чисто биохимически, без регулятора, эпигенетики, и получилось, что даже полностью погасшая память может восстанавливаться. То, о чем вы спросили, мы делали один в один — все получилось замечательно.

— Тогда зачем действовать так сложно — с помощью эпигенетического регулятора?

— Чтобы регулировать процесс естественным образом. Регуляторы нужны, чтобы вырабатывались вещества, которые могут воздействовать на определенные когнитивные процессы. Проблема на сегодня только в одном: когда мы даем регуляторы, они воздействуют на все гены, а мы хотим, чтобы они воздействовали только на конкретные гены. Мы пытаемся понять и воспроизвести путь, с помощью которого этого достигает природа. Она, по видимому, умеет делать так, чтобы воздействие оказывалось только на гены серотонина, потому

что память образуется и исчезает: она пластифицируется, ее можно изменить.

— Если вся эта долгая и сложная работа получится, что это даст?

— Мы пытаемся найти пути регуляции уровня памяти, и если найдем, то в первую очередь сможем предсказать, в каких условиях и при каких воздействиях можно улучшить образование памяти для «плохих учеников». Потому что, повторю, эпигенетические регуляторы — естественные, это не грубое химическое воздействие. Бутират натрия, который мы применяли, всего на одну молекулу отличается от гамма-аминомасляной кислоты — основного тормозного медиатора в нашей нервной системе. Теоретически это вещество может образовываться в нашем организме, и оно —

очень эффективный эпигенетический регулятор. Возможно, мы найдем пути активации памяти и, наоборот, поймем, при каких условиях блокируется образование памяти. Мы точно докажем, что, фигурально выражаясь, если ученику дать линейкой по голове (что,

к сожалению, практиковали некоторые учителя), никакой новой памяти у него образоваться не может, кроме отвращения, которое будет стойким.

— Если это уже делается на крысах и других млекопитающих, для чего нужно повторять эксперименты на улитках? Что это дает для того, чтобы в конце концов прийти к человеку?

— Трудоемкость работы на улитках примерно в десять раз ниже, чем на крысах, а по цене — в сотни раз ниже, при этом молекулярные механизмы очень похожи. Оказалось, что, например, сложный белковый фермент протеинкиназа М-зета у человека, крысы и улитки совпадает на 80–90%. Специфические механизмы пластичности памяти, которые недавно обнаружены, оказались в эволюции очень консервативными. Поэтому как раз на молекулярном уровне мы можем изучать эти механизмы, используя улиток, а на системном, конечно, нет.

У улитки мало нервных клеток, хорошо изучены нервные сети, и мы знаем, какие между ними существуют связи, можем все проверить на уровне одного синапса. У нас есть модель ассоциативного обучения — на уровне трех нервных клеток, мы контролируем каждую и можем регистрировать ассоциативные изменения синаптических связей. На позвоночных это принципиально невозможно сделать, потому что у них слишком много нейронов.

— А есть сравнительные работы, которые раскрывали бы этот консервативный эволюционный механизм памяти?

— Есть, но они сейчас ведутся главным образом в нескольких лабораториях: Тогда Сактора, первооткрывателя РКМЗ, в Университете штата Нью-Йорк; Дэвида Гланцмана в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе; и наша — третья. Любое событие в жизни высших животных, в том числе и человека, оставляет свой отпечаток в его памяти, точнее, физический след в протоплазме. Носителями этой информации в частности выступают молекулы РНК, которые выполняют массу различных функций, включая регуляцию многих клеточных процессов. Команда Гланцмана по этой причине избрала именно молекулу РНК для своих экспериментов с «переносом памяти» между живыми существами. А объектом их исследования стали морские моллюски вида *Aplysia californica*. У нас с ним уже очень давно работы идут параллельно — мы дружим и обмениваемся данными с 1980-х гг. В этом году Гланцману удалось опубликовать результаты исследований по «переносу памяти»: он взял обученную улитку, выделил у нее гемолимфу (аналог крови, то же самое, что и спинномозговая жидкость у человека), затем ввел необученным улиткам, и по их поведению можно было судить, что воспоминания сохранились.

— Как это возможно?

— Прежде многие исследователи пытались «перенести» память с помощью белков, но без четкого результата. Никто не задумывался о том, что можно задействовать микро-РНК, потому что она очень нестабильна в растворе. Но оказалось, что все-таки существует устойчивая очень маленькая фракция микро-РНК (всего 21–28 нуклеотидов). А ведь микро-РНК — это один из основных эпигенетических регуляторов, воздействующий на работу всего нейрона.

Более того, коллеги воспроизвели *in vitro* моносинаптические связи между конкретными нейронами, добавили туда микро-РНК и получили изменения, которые отразились на поведении животного именно так, как предполагалось. Кстати, исследователи не употребляют выражение «перенос памяти» (это образ), они пишут «перенос энграммы (записи, "следа") памяти». То есть они не перенесли память в буквальном смысле, а изменили нейронную сеть животного таким образом, будто в ней уже содержится память о данном событии.

— Без обучения?

— Без обучения! При помощи эпигенетической регуляции эти состояния можно воспроизводить, используя микро-РНК.

Еще я хотел сказать, что в геноме человека, как сегодня известно, больше 40 тыс. генов. А у улитки в три раза больше (!), и никто не знает почему. Из этих 100 тыс. генов белки кодируют всего около 2%, а остальные кодируют РНК и микро-РНК, управляющие работой всех, в том числе и «белковых», генов. Эпигенетика открывает возможности

для управления этими 98%. Ведь судьбу каждой клетки определяет уровень эпигенетической регуляции генома. Оказывается, у взрослого организма судьба нервной клетки предопределена: она уже не делится, эпигенетическая регуляция ввела ее в определенное состояние. В зависимости от этого состояния меняется ее место в общей сети — это и есть память. Изменилась надолго — значит, нервная сеть будет работать по-другому, мы что-то приобрели или потеряли.

Похоже, это происходит на синаптическом уровне, но управляется эпигенетической регуляцией в ядре клетки. Добавлю, что четыре года назад слово «эпигенетика» было довольно редким в нейрофизиологии. А мы еще пять лет назад подали на грант по эпигенетике и получили его. Поэтому у нас сейчас есть серьезные наработки в этой области.

В прошлом году в США на конгрессе по нейронаукам была впервые организована отдельная сессия по эпигенетической регуляции памяти. Это постерная секция, посвященная исследованию когнитивных функций, в основном позвоночных. На беспозвоночных в мире в этой области работают всего несколько лабораторий. А вообще, эпигенетическая регуляция сейчас становится горячей темой.

— Вернемся к началу разговора о сознании животных. Даже беспозвоночные обладают эмоциями, памятью, способностью принимать решения, обучаться. Наверное, можно сказать, что все это — составляющие сознания либо интеллекта?

— Повторю: для этого нужно определить, что такое сознание и что такое интеллект.

— А вы можете дать свое определение? Например, интеллекта.

— Каждый имеет свои определения, универсального, к сожалению, нет. Для меня интеллект — это прежде всего способность к обучению. Умная собачка тут же поймет: если я щелкнул пальцами и затем ее покормил, потом, когда я щелкну пальцами, она тут же прибежит есть — она же умная собачка. А некоторые, например кошки, на это не реагируют, у них другие стимулы и другой интеллект, с нашей точки зрения. Интеллект всегда субъективен. И как кошки оценивают друг друга, я не знаю. У меня сейчас дома три кошки, и я смотрю на них с удивлением — все разные.

— А насекомые — что с ними?

— С точки зрения высших функций мозга у насекомых слишком стереотипное поведение: оно жестко запрограммировано, они не могут выйти за его пределы. Та же кошка может вас воспринимать и видеть и сидя, и стоя, и лежа. Но если вы перевернете насекомое, оно, скорее всего, уже ничего видеть не будет, потому что у него отключатся все эти механизмы. Но если взять, например, муравьев, у них есть разные категории:

муравьи-рабочие, которые только работают и не реагируют на опасность, солдаты, у которых диапазон реакций гораздо более широкий, потому что они могут отреагировать на опасность, а могут работать как рабочие. То есть у них этот диапазон фиксирован или генетически, или благодаря каким-то эпигенетическими регуляторам — у кого-то шире, у кого-то уже, но в целом он у насекомых очень узкий.

Хотя у той же виноградной улитки диапазон реакций, несмотря на то что она почти ничего не видит (только несколько сантиметров вокруг), химическая чувствительность находится на уровне млекопитающих, например крыс. У них очень высокая чувствительность к запахам. Они довольно хорошо ориентируются и могут найти источник пищи на расстоянии полуметра; по отношению к длине их тела это очень неплохо. И тактильное восприятие, конечно.

Поэтому если мы условно используем понятие «интеллект» как уровень способности взаимодействия с окружающим миром, то, возможно, это определение приемлемо. Быть может, в животном мире не все определяется нервной системой, у насекомых главенствует социальная иерархия и действует не одна особь, а целое сообщество. Но у каждой отдельной особи нервная система — определяющая, без нее ничего не происходит, и работает она по жесткой программе, а вот пластичность достигается уже за счет разнообразия в популяции. Каждый организм в коллективном выражении немножко «тупее», если можно так выразиться, чем организм, действующий индивидуально. У меня сложилось такое впечатление в результате многих лет работы с животными. Особь, жизнь которой в большей степени определена социальной средой, выдает более стереотипное, практически без вариантов, поведение по сравнению с особью, живущей относительно независимо и вынужденной выживать самостоятельно.

— Каковы основные направления работы института сегодня?

— 1990-е гг. мы пережили очень трудно. В основном сохранились те лаборатории, которые сотрудничали с зарубежными коллегами, то есть работали на международном уровне. Классические павловские исследования 1970-х гг. на собаках практически закончились, прежде всего потому, что они не поддерживаются международной общественностью по разным причинам, в том числе этическим.

Главное, сегодня изменился сам формат исследований на животных — эксперимент проводится с обязательным учетом молекулярных процессов. С другой стороны, исследования на людях сейчас получили второе дыхание, в том числе исследования сознания, потому что появились новые технологии: МРТ, магнитная энцефалография,

из недавнего — ближневолновая спектроскопия, новый интересный метод. ЭЭГ, конечно, развилась по максимуму, в том числе и способы обработки данных, которые позволяют получать очень любопытные результаты. Например, как получить данные об эмоциональном состоянии человека, основываясь на показаниях энцефалограммы? Оказалось, это возможно. Недавно был доклад на эту тему из лаборатории члена-корреспондента РАН, профессора А.М. Иваницкого. Например, хорошо или плохо испытываемый воспринимает изображение, вызывают ли они у него приятные или неприятные ощущения — все это можно узнать из ЭЭГ. И самая большая проблема, поскольку энцефалограмма представляет собой отзвук работы нервной системы, — расшифровать эти сигналы, понять, что они означают.

В институте проводятся исследования и на молекулярном уровне. У нас появилось абсолютно новое молекулярно-биологическое направление работы — молекулярная нейробиология, им занята почти четверть сотрудников. Отмечу: наш институт — физиологический, но в нем работают и молекулярные биологи (это редкое сочетание), способные синтезировать вещества, с помощью которых мы можем управлять в том числе и геномом — включать какой-то ген или, наоборот, усилить его экспрессию. Более того (и это одно из новых направлений), мы можем привнести в организм животного чужеродный ген, который служит сенсором определенных событий, и управлять такими клетками с помощью света. Можем экспрессировать выработку сенсоров кальция и наблюдать десятки клеток одновременно — их активность в свободном поведении у позвоночных животных. Еще лет пять назад это было абсолютно недостижимо. Такие исследования довольно дороги, но мы сумели наладить у себя производство собственных препаратов для экспериментов.

— Это очень важно, когда в рамках одного учреждения физиология объединяется с молекулярной биологией и генетикой. Представители разных специальностей вынуждены работать вместе и понимать друг друга...

— Вчера, например, на ученом совете мы слушали доклад под названием «Молекулярная нейробиология», в котором участвовало пять лабораторий института из 14 существующих, каждая делает свою часть работы. Практически все наши лаборатории сейчас применяют нейрогенетические подходы. В этом и была моя задача как директора. Только объединение разных наук и всех существующих методов позволит нам приблизиться к ответам на вопросы, что такое сознание, как оно проявляется у животных, в чем отличие человека от животных. ■

Беседовала Елена Кокурина



ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛ

Научная Россия

<http://scientificrussia.ru>





В начале июля этого года состоялась VII международная конференция «Рубежи нелинейной физики», организованная Институтом прикладной физики РАН (Нижний Новгород). Такая научная конференция проводится раз в три года на протяжении последних 18 лет, и за это время в ней приняли участие многие мировые звезды науки и лауреаты Нобелевской премии.

ВОЛНА НАУКИ СНОСИТ БАРЬЕРЫ

Нынешняя конференция была посвящена обзору достижений современной физики нелинейных волн и проходила на борту теплохода «Константин Коротков» во время круиза по Волге. Тематика была обширной: нелинейная оптика, акустика, нелинейная физика конденсированных сред, взаимодействие лазерного излучения с плазмой, нелинейная динамика квантовых систем и квантовый хаос, волновая динамика океана и атмосферы, нелинейная физика астрофизической плазмы и многое другое.

В конференции, которая стала научным событием поистине мирового масштаба, приняли участие более 150 ученых из 18 стран, в том числе

действующие и будущие номинанты Нобелевской премии в области квантовой физики. Особенно хочется отметить большое количество молодых ученых, прибывших из разных уголков нашей страны.

Сочетание рабочей обстановки с возможностью отдохнуть, насладиться изумительными видами создало продуктивную атмосферу, которую отметили все участники конференции, с кем довелось беседовать. И вполне закономерно, что именно события такого уровня отчетливо демонстрируют мощь мировой науки, которая продолжает не просто размывать, а сносить все барьеры идеологических, политических и любых других разногласий.



**АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ СЕРГЕЕВ,
АКАДЕМИК, ПРЕЗИДЕНТ РАН:**

— Александр Михайлович, на международных научных конференциях есть некая обязательная программа, однако бывают темы, которые не входят в регламент, но о которых хочется рассказать. Есть ли у вас такие темы?

— На подобных конференциях, помимо официальных программных выступлений, всегда есть кулуарное общение, роль которого очень велика. Ведь на такие мероприятия едут получить не только информацию, которая официально звучит с трибуны, но и какие-то сведения по конкретному вопросу, когда можно один на один пообщаться с другим участником конференции. И это «вытягивание» дополнительной, уточняющей информации очень важно для ученых. После лекций выступающих обычно сразу обступают и задают вопросы. Когда вы плывете на теплоходе, лектору никуда не деться, особенно от молодежи, которая

добивается от него ответов на свои вопросы. Очень существенно, что на этих конференциях крайне демократичная атмосфера и молодежь имеет возможность общаться со светилами из своей области. А для ученых не столько важны аплодисменты после лекции или доклада, сколько важна неформальная, кулуарная часть, когда к ним подходят и задают вопросы. Это свидетельство того, что вы задели определенную струну.

— **Насколько имеет значение эта обратная связь?**

— Самое главное — что она есть. Как ученые себя оценивают? Можно говорить об индексе Хирша, о цитированиях, но для ученого основное — это признание в среде профессионалов, которые могут даже занимать конкурентные или дискуссионные позиции. В науке, как правило, все объективно. И если ты получил результат, рассказал о нем и дальше получаешь обратную связь — это и есть момент счастья для ученого. Это означает признание.

— **Что для вас важнее — признание профессионалов или обратная связь со стороны молодежи, которая проявляет интерес?**

— Нужно и то и другое. Когда вы получаете признание профессионалов, вы понимаете, что работаете на рубеже науки. Ведь наша конференция так и называется: «Рубежи нелинейной физики». Можно очень быстро отстать, если не общаться постоянно и не получать новую информацию, связанную с развитием науки в твоей области. Когда ты говоришь и тебя слушают — это значит, что ты произносишь что-то новое. Многие ученые уходят из серьезной науки именно потому, что теряют темп и им самим уже неинтересно, потому что они не могут вызывать интерес у других. Так и наступает конец научной карьеры.

— **Если взять выступление перед коллегами или перед заинтересованной молодежью, есть ли разница в языке общения?**

— Конечно есть! Чтобы быть реально полезным, наибольшее число слушателей должно быть максимально долго сосредоточено на вас. Аудитории достаточно большие — до 500 человек, и в них всегда присутствует некий шум. И этот уровень шума предельно точно свидетельствует о том, насколько аудитория вам внимает. Если в помещении абсолютная тишина, значит вы достигли максимального эффекта, потому что никто ничего не делает, только слушают вас. Но чтобы слушала молодежь и чтобы слушали профессионалы, нужны совершенно разные подходы.

Когда вы общаетесь с молодежью, вам важно рассказать то, что вы до них доносите, просто и понятно. У молодежи нет опыта, глубоких знаний, но есть большое желание узнать. В принципе, вы можете их заинтересовать просто тем, что умело и красиво объясните известные вещи. Старшим

коллегам, которые работают в вашей области, вы обязательно должны рассказывать о чем-то новом. Они профессионалы, много знают, и вы их можете заинтересовать только тем, что они пока точно не представляют. Тогда они настораживаются. Здесь иногда важна парадоксальность. Вы вбрасываете какой-то парадокс и говорите то, что воспринимается даже с недоверием.

Здесь, на конференции, аудитория разновозрастная. Но молодежь в основном — кандидаты и доктора наук. Они серьезно выстраивают свою карьеру, им важно получить индивидуальное внимание. На этой конференции многие из них знакомятся с действительно выдающимися людьми, такими как Марлан Скалли и Пол Коркум. И если им удастся запечатлеть себя в их сознании, это окажется очень полезным для их научной карьеры.

— Может такое случиться, что ученый вбрасывает настолько парадоксальную, невероятную мысль, что половина аудитории ее сразу отмечает как антинаучную и теряет интерес?

— Я, пожалуй, не соглашусь с тем, что если слишком парадоксально, то аудитория теряет интерес. Наоборот, мне кажется, что слушают даже с большим интересом. Иногда кажется, что человек говорит какую-то чушь, вроде совершенно очевидно, что это неправильно. Но когда дальше дело доходит до реального объяснения, начинаешь понимать смысл. Ведь все новое, интересное должно в конце концов объясняться достаточно просто. Парадоксальность становится понимаемой, когда находится объяснение. Когда начинают излагать какой-то парадокс и докладчик доносит до тебя, как он его разрешает, понимаешь, что все гениальное просто. Ведь еще Пушкин говорил: «И гений, парадоксов друг...»

**АЛЕКСАНДР ГРИГОРЬЕВИЧ ЛИТВАК,
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ ИНСТИТУТА
ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ РАН, АКАДЕМИК,
ЧЛЕН ПРЕЗИДИУМА РАН, ДОКТОР ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОР:**

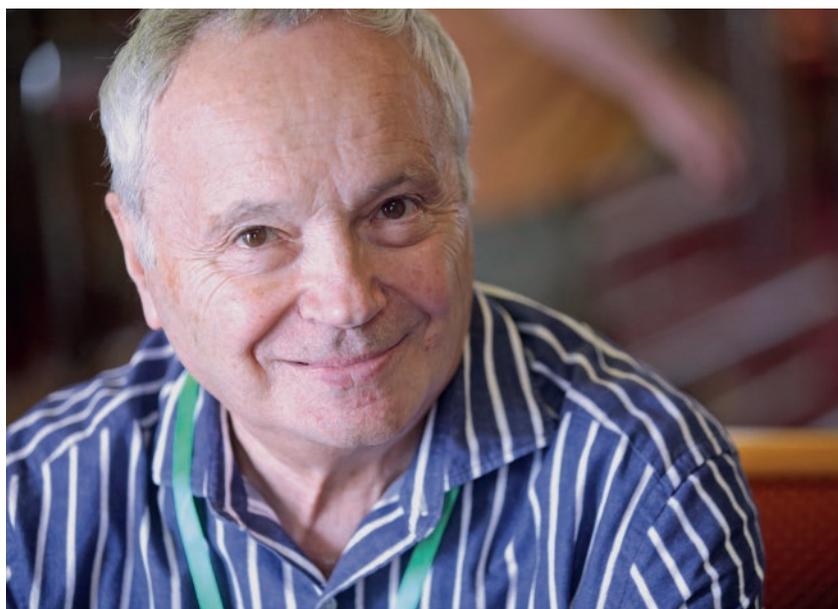
— Александр Григорьевич, кому принадлежит идея такого формата проведения научной конференции — на пароходе?

— Думаю, что установить имя автора этой идеи не удастся: такие конференции приобрели популярность еще в советские времена. Каков основной плюс такого формата? Все участники на протяжении недели оказываются в замкнутом пространстве теплохода и кроме официальных научных заседаний имеют широкие возможности для дополнительных неформальных научных дискуссий и персональных научных

контактов. Всем предлагаются комфортные условия на лучшем из доступных нам пароходе. Можно привезти с собой жену или мужа, кто-то берет даже детей. Предлагаются интересные экскурсии в исторических городах России. Вечером — концертные программы с участием талантливых музыкантов. На конференции приглашается много молодых ученых, аспирантов и даже студентов, для них это возможность контактов с крупными учеными.

Инициатива по проведению таких конференций связана с опытом работы Института прикладной физики РАН — одного из признанных лидеров в области исследования колебательных и волновых процессов. В советской науке эта область получила название «радиофизика». В радиофизике исследуются колебания и волны любой природы, в любых средах и во всех диапазонах частот и длин волн (от очень низкочастотных акустических процессов до излучения микроволнового, оптического и рентгеновского диапазонов), при любом уровне интенсивности, вплоть до взаимодействия экстремально интенсивного излучения с веществом. Несмотря на большое разнообразие физических (и не только) систем, существует общность в постановке проблем и методах их исследования, дающая уникальную возможность для эффективного сотрудничества специалистов в области генерации и распространения электромагнитных и акустических волн, динамики атмосферы и океана, физики плазмы и лазерной физики, астрофизики, квантовых процессов, нейродинамики и др. Находить общий язык в этих разных областях чрезвычайно полезно для успеха в науке.

Опираясь на имеющийся опыт работы, еще в 2001 г. мы решили организовать представительную конференцию «Рубежи нелинейной физики»



со значительным числом лидеров мировой науки. Первая конференция была посвящена столетию со дня рождения академика А.А. Андропова, одного из основателей радиофизики, в том числе теории нелинейных колебаний; ее мы провели на суше, в Нижнем Новгороде. В ней участвовали многие известные ученые. Именно на этой конференции мы установили контакты с будущим нобелевским лауреатом Жераром Муру и с тех пор много лет работаем вместе. В 2004 г. решили перебраться на паромод, и нынешняя конференция — уже седьмая.

— В чем ее отличие от предыдущих?

— Отличие и в выбранных тематических разделах физики, и в составе ученых. Хотя немало тех, кого можно назвать постоянными участниками. В каждой конференции принимают участие выдающиеся ученые. Например, в 2004 г. участвовали два нобелевских лауреата: академик В.Л. Гинзбург, которому тогда было 86 лет, представивший два 40-минутных доклада, и французский ученый Клод Коэн-Таннуджи, который тоже выступал с пленарным докладом. В этот раз пленарные доклады представили два иностранных члена РАН, они же члены Американской национальной академии наук: профессор Марлан Скалли (США) и профессор Пол Коркум (Канада).

— Были ли выдвинуты на этой конференции новые интересные идеи?

— Мы получили много важной и интересной информации. К сожалению, не всякая информация может радовать. Почему? Потому что у нас есть

собственные идеи, планы для их реализации и попытки получить поддержку. А когда мы слышим, как наши коллеги, которые от нас отставали, рассказывают, что им уже частично удалось реализовать то, что мы задумывали и на что надеялись, это, с одной стороны, вызывает радость за науку в целом, с другой — огорчает непосредственно нас.

Приведу пример. Руководитель научного центра из Южной Кореи рассказал об экспериментах с использованием недавно созданного мультитераваттного лазерного комплекса, при сооружении которого использовались некоторые подходы, впервые примененные в нашем институте при создании несколько менее мощного субпетаваттного лазера. Есть известная идея: при фокусировке сверхмощного лазерного излучения в плазме можно получить такие сильные электрические поля, которые обеспечат рекордно высокие темпы ускорения заряженных частиц по сравнению с современными ускорителями. Так, самый длинный в мире линейный ускоритель SLAC в Стэнфордском университете (США) длиной 3 км ускоряет электроны до энергии 50 ГэВ. В Корее в экспериментах с новым лазером ускорили электроны на длине всего 7 см до энергии 5,5 ГэВ. Можете оценить возможные перспективы. Обидно, что нами был предложен проект создания на основе российских технологий лазерного комплекса с мощностью, в десятки раз превышающей мощность корейского лазера. Если бы нам открыли финансирование проекта, формально



Профессор Оклендского университета (США) А.Н. Славин (слева) и научный сотрудник ИРЭ РАН А.Р. Сафин (справа)

поддержанного руководством страны, мы уже на начальной стадии давным-давно создали бы лазер-прототип и заняли лидирующие позиции в мире.

— **Бывает, что из разных докладов на конференции складывается что-то совершенно новое?**

— Бывает, и довольно часто. Есть ученые, которые очень цепко воспринимают новое (даже не в профессионально близкой им области) и выработывают предложения по применению новых подходов в других областях науки. Наши конференции способствуют такой междисциплинарной активности.

— **Есть ли эффект от подобных конференций для развития российской науки?**

— Эта конференция значима и по содержанию, и по составу участников. Всего в ней принял участие 151 ученый из 22 стран, в том числе 80 человек из России, 20 из Германии, 12 из США, по четыре из Франции и Великобритании, по три из Австралии, Израиля, Италии, Китая и Южной Кореи. Общее число сотрудников зарубежных лабораторий и университетов — 71, среди них 20 — российско-го происхождения.

В числе российских ученых — пять академиков и девять членов-корреспондентов РАН. На конференции было представлено 158 докладов, в том числе 30 пленарных докладов, ориентированных на междисциплинарную аудиторию.

— **Такое тесное взаимодействие с иностранными учеными поможет и нам продвигаться вперед?**

— Приятно, что множество докладов иностранных ученых делаются в соавторстве с российскими, в том числе с сотрудниками нашего института. Это тоже привлекательный фактор для иностранных ученых, чтобы продолжать сотрудничество. В конференции приняли участие около 30 молодых ученых. Мне очень нравится, что наша молодежь, делая доклады, показывает отличное владение английским языком. И сами результаты интересны — видно, что они вполне интегрированы в мировую науку. С другой стороны, это и опасно, потому что кого-то из молодых мы через некоторое время недооцениваемся — их с удовольствием приглашают работать за границу. Надо создавать у нас в стране приемлемые условия для занятий наукой. Я говорю даже не столько про экономическую сторону и социальные условия, сколько про возможность вести исследования на современном уровне. По-моему, неправильно говорить — «утечка мозгов», просто всякий человек ищет, где он сможет достойно себя реализовать. Наша конференция — в том числе и вклад в создание таких условий для научной работы.



ВЛАДИМИР ЕВГЕНЬЕВИЧ ФОРТОВ,
АКАДЕМИК, ПРЕЗИДЕНТ РАН (2013–2017),
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РАН:

— **Владимир Евгеньевич, насколько оправдывает себя проведение такой масштабной конференции в сегодняшнее довольно непростое время?**

— То, что в такое сложное время Институт прикладной физики РАН проводит эту конференцию, очень дорогого стоит. Вы наверняка обратили внимание на то, что здесь очень много молодежи и что эта молодежь говорит на великолепном английском языке. Эта молодежь пишет, публикует и докладывает свои работы без соавторства. В науке, чего греха таить, есть такой эффект, когда имя начальника зачастую вписывают в работу исполнителя. А здесь этого нет, здесь очень высокая культура, которая идет от организаторов этого мероприятия — академиков А.В. Гапонова-Грехова и А.Г. Литвака. А сегодня в этой цепочке очень ярким и важнейшим элементом стал академик А.М. Сергеев.

Обратите внимание: здесь очень много людей из-за границы, и они едут сюда не только смотреть красоты, но и, главное, заниматься наукой. Поэтому и доклады здесь самого высокого уровня.

— **Что для вас важнее — присутствие мировых звезд физики или большое количество молодежи?**

— Все важно. Если вас интересует наука и вы приехали за новыми знаниями, контактами, то вы не смотрите в паспорт, вам неважно, сколько человеку лет.



Теплоход «Константин Коротков» на целую неделю стал центром научного притяжения звезд нелинейной физики со всего мира

Но есть еще один элемент, который я бы отметил. Конференция проходит в закрытом пространстве — на плавущем по реке теплоходе. Физики говорят, что это «адиабатическое приближение»: все находится в одном месте. Поэтому научные и человеческие контакты происходят не только на лекциях. Очень большую роль играют индивидуальные контакты. Всегда можно подойти и задать вопрос уже не в зале, где вы неизбежно получите короткий ответ, но обсудить его в режиме диалога. Мы только что с одним специалистом за 15 минут неформального разговора фактически придумали новую задачу, связанную с турбулентностью.

Я сам провожу такие конференции в Кабардино-Балкарии, на Эльбрусе. Там ситуация похожая — замкнутая гостиница, и есть гора, с которой можно спускаться на лыжах. Остальное время мы взаимодействуем по науке так же, как и здесь, — *face to face*, лицом к лицу.

— А кого бы вам особенно хотелось видеть на такой конференции, кого очень хотелось бы пригласить?

— Мне много кого хотелось бы пригласить, но я понимаю, что не все возможно. Того же А.В. Гапонова-Грехова. Если бы он сюда приехал, он бы создал особую атмосферу — это замечательный, талантливый, многогранный, предельно честный человек. Очень интересно было бы пригласить академика В.Е. Захарова — это выдающийся ученый, который был на прошлой конференции. Я бы хотел, чтобы А.М. Сергеев больше времени проводил здесь, а не среди чиновников. И он тоже, по-моему, этого очень хочет.

— А из зарубежных ученых кого бы вам хотелось видеть?

— Это люди типа профессора Грегора Морфилла, известного немецкого физика Вернера Эбелинга, многие другие коллеги и друзья. Есть достаточно

причин, по которым люди хотели бы, но не приезжают на те или иные конференции. Я, например, на многие конференции не могу поехать — либо временные накладки, либо другие мероприятия. Но я убежден, что нужно большое количество времени, чтобы самому заниматься наукой, а потом уже докладывать, а не просто ездить на конференции.

— Планируется ли в будущем расширение состава участников?

— Я бы не расширял — все-таки важна возможность контакта. Если будет тысяча человек, это превратится в парадное мероприятие. А прелесть такого рода конференции состоит в том, что тут собираются профессионалы. На больших конференциях важная роль неизбежно отводится «организаторам науки», а это уже приводит к потере научной атмосферы. Мне кажется, что оптимальное количество — 150–200 человек. Это то, что делает научную конференцию рабочей, а не парадной.

— Атмосфера действительно прекрасная.

— Атмосфера рабочая, доброжелательная, но и очень профессиональная и продуктивная. Если здесь человек говорит что-то не то, ему на это укажут коллеги. В этом можно не сомневаться — среди профессионалов так принято и идет на пользу всем.

— Есть ли у этой конференции поддержка за пределами научных сообществ?

— Она организована не для того, чтобы получать поддержку, а для науки. И здесь как раз научные результаты самого высшего класса. Люди рассказывают о работах, которые еще не опубликованы, а только отправлены в печать. И такой формат, я убежден, — самый продуктивный. Если вы хотите получать содействие, вы должны сначала представить хороший результат, а потом ожидать поддержки этого хорошего результата.

**ОЛЬГА АНАТОЛЬЕВНА КОЧАРОВСКАЯ,
РОССИЙСКИЙ И АМЕРИКАНСКИЙ ФИЗИК,
ПРОФЕССОР ТЕХАССКОГО УНИВЕРСИТЕТА,
ДОКТОР ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК:**

— Ольга Анатольевна, на этой конференции ваше имя постоянно на слуху, а большие ученые говорят о вас с восхищением. Как вам это удается?

— Началось все с Института прикладной физики РАН в Нижнем Новгороде, где я работала в отделе, руководимом Я.И. Ханиным — выдающимся ученым, автором широко известной монографии по квантовой радиофизике. Мы опубликовали работы, которые привлекли внимание зарубежных ученых.

— Что это были за работы?

— Это были две статьи. В одной мы предсказали явление электромагнитно-индуцированной прозрачности, суть которого состоит в том, что две электромагнитные волны, резонансные смежным атомным переходам, могут проходить сквозь такую атомную среду практически без поглощения, тогда как каждая из них в отдельности полностью бы в ней поглотилась. Во второй статье мы фактически предложили одно из применений этого явления — это лазер без инверсии населенностей, то есть возможность лазерного излучения в среде с частично заселенным верхним уровнем в условиях, когда его населенность не превосходит населенность нижнего рабочего уровня.

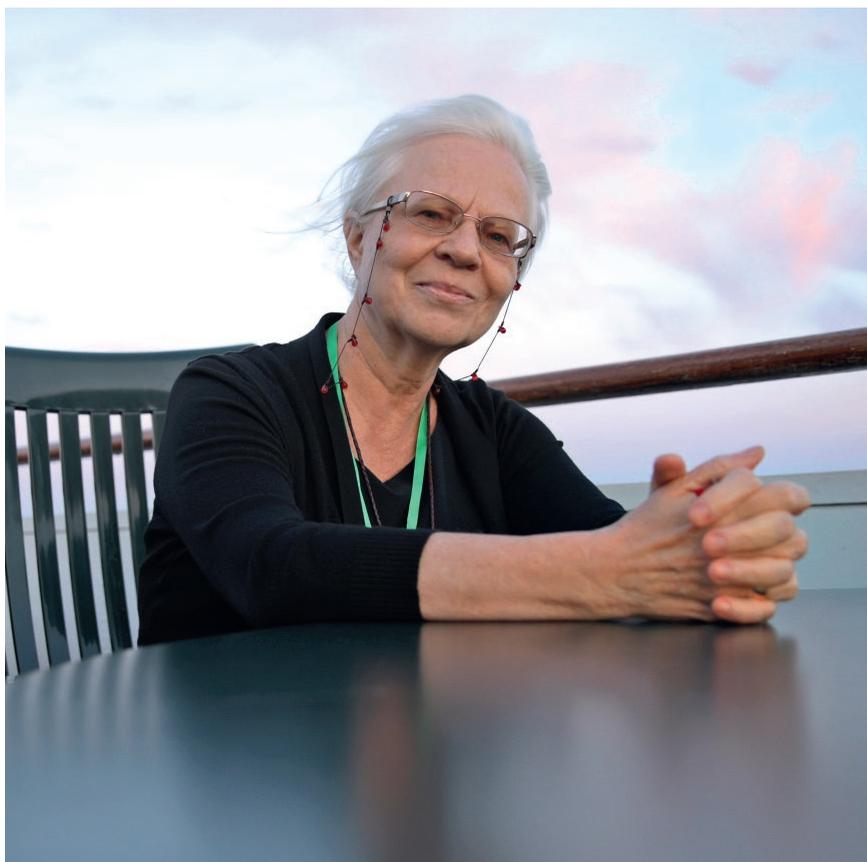
Поначалу казалось, что это конкретное применение даже более интересно и важно, чем само явление электромагнитно-индуцированной прозрачности, поскольку оно выглядело обещающе для развития рентгеновских и гамма-лазеров, то есть лазеров в высокочастотном диапазоне частот. Но реализовать это применение в высокочастотном диапазоне оказалось непросто, хотя остаются группы, которые продолжают над этим работать. Зато электромагнитно-индуцированная прозрачность действительно пошла в дело и нашла много других применений, таких как высокочувствительные магнитометры (приборы для измерения величины и направления магнитного поля), быстрые переключатели электромагнитного поля, контролируемые линии оптической задержки и квантовой памяти, эффективные преобразователи частоты электромагнитного излучения, системы оптической бистабильности, многие другие полезные приборы.

— Вы ведь стояли у истоков организации «плавающих» конференций?

— Да, я участвовала в организации всех этих конференций. Но сама идея принадлежит академику А.Г. Литваку. Я бы сказала, что это исключительно его конференция, хотя многие ему помогают, как и я. Это прекрасная конференция, и я всегда рада пригласить сюда своих друзей, потому что уверена, что им это очень понравится.

— В чем, на ваш взгляд, преимущество такого формата проведения конференций?

— По-моему, здесь два основных преимущества. Во-первых, это конференция очень широкого плана, сюда приезжают ученые, представляющие разные направления: оптику, астрофизику, гидрофизику, общую теорию нелинейных волн. И нас объединяет то, что у нас общий базис, а именно — нелинейная динамика, более широко — то, что в нашей Нижегородской школе называется радиофизикой, то есть взаимодействие волн различной природы с веществом. Это, по сути, основа всей физики. Очень полезно пообщаться с коллегами, которые работают не только в твоей области, но и с близкими задачами в другой области, это стимулирует, появляются новые идеи. Второе преимущество состоит в том, что мы все здесь «варимся в одном котле»: все время — от завтрака



Доктор физико-математических наук О.А. Кочаровская

и до ужина — мы проводим вместе, и это стимулирует обсуждение наших тем друг с другом. Я очень люблю эту конференцию.

— **Ваша непосредственная направленность — это лазеры?**

— Лазеры и их взаимодействие с веществом. Мы занимаемся взаимодействием лазерного излучения с атомными и ионными переходами в газах, твердых телах и плазме и даже резонансным взаимодействием с ядерными переходами.

В рамках сотрудничества с Институтом прикладной физики РАН мы совсем недавно закончили интересную работу, которую отправили в *Physical Review Letters* — один из самых престижных журналов США в области физики. В ней мы предложили возможность усиления высоких гармоник и получения интенсивных аттосекундных импульсов в мягком рентгеновском диапазоне. Метод получения аттосекундных импульсов за счет генерации гармоник в свое время был предложен и развит известным ученым Полом Коркумом (также участвующим в настоящей конференции). Однако этот метод хорошо работает для относительно низких частот, то есть для вакуумной ультрафиолетовой области спектра, а в более высоком диапазоне частот, то есть для энергии фотонов больше сотни электронвольт, энергии импульсов уже исключительно низкие.

В прошлом году Жерар Муру и Донна Стрикленд получили Нобелевскую премию за развитие метода усиления чирпированных фемтосекундных импульсов в широкополосной активной среде. Но фемтосекундный импульс — это длительность 10^{-15} с, а я говорю об аттосекундных импульсах, которые еще на три порядка короче. Спектральная ширина импульса обратно пропорциональна его длительности. Таких широкополосных сред, которые бы позволили усиливать

аттосекундные импульсы, в настоящее время просто нет. По-видимому, их нет вообще, поэтому техника усиления чирпированных импульсов не может быть применена для усиления аттосекундных импульсов. И вот мы с научным сотрудником ИПФ РАН В.А. Антоновым и его аспирантом И.Р. Хайрулиным предложили метод усиления таких импульсов, который основан на модуляции частоты резонансного перехода усиливающей плазменной среды в рентгеновской области инфракрасным полем. Замечательно, что для модуляции активной плазменной среды может быть использован тот же самый инфракрасный лазер, который применяется для генерации гармоник. В этом случае исходное резонансное усиление равномерно перераспределяется между всеми гармониками без изменения фазовых соотношений между ними и, следовательно, без изменения формы усиливаемых импульсов. Нам кажется, это очень перспективно, и по крайней мере две экспериментальные группы заинтересованы в реализации этой техники.

— **Какое практическое значение это может иметь?**

— Техника усиления фемтосекундных импульсов получила огромное применение. В том числе она позволила генерировать лазерную плазму и привела к созданию компактных плазменных лазеров в мягком рентгеновском диапазоне. Кроме того, вся так называемая физика сверхсильных полей фактически основана на этой технике, благодаря которой она и развилась. Одно из наиболее важных применений — это ускорение заряженных частиц: электронов, позитронов, ионов (широко используемых, в частности, для лечения раковых заболеваний) Если раньше для этих целей требовались ускорители — а это очень дорогостоящая техника огромных масштабов (~100 м — 1 км), — то с помощью новой лазерной технологии сейчас уже получают ускорение электронов до нескольких гигаэлектронвольт на масштабе ~1 см. По-видимому, в будущем крупномасштабные современные ускорители будут заменены настольными лазерными установками. Что касается интенсивных аттосекундных импульсов в мягком рентгеновском диапазоне, включая так называемое окно прозрачности воды (диапазон длин волн между 2,3 и 4,4 нм, в котором вода остается практически прозрачной, тогда как углерод и, следовательно белки, хорошо поглощают), то одно из их потенциальных применений — визуализация динамики белков в живой клетке.

— **То есть тенденция остается актуальной: оборудование становится компактнее и дешевле?**

— Абсолютно верно. И это касается всех областей науки. Громоздкие и дорогие установки постепенно будут заменяться гораздо более дешевыми и компактными лазерными аппаратами, которые приведут к их несравненно более широкому применению.



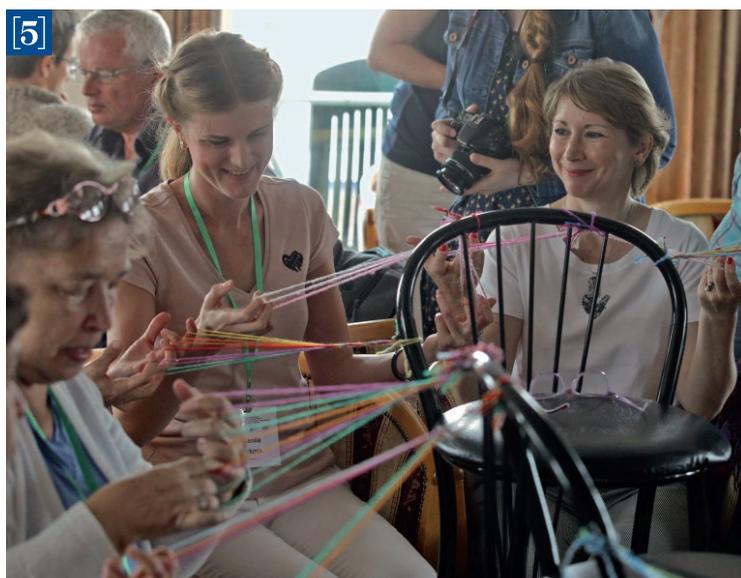
Профессор Потсдамского института изучения климатических изменений Юрген Куртс (слева) и профессор ИПФ РАН А.М. Фейгин (справа)

1. Президент РАН А.М. Сергеев открывает конференцию
2. Профессор ИПФ РАН Е.Н. Пелиновский
3. Академик Л.М. Зеленый
4. Зав. отделом нелинейной электродинамики ИПФ РАН М.Д. Токман (слева) и А.М. Фейгин
5. Руководитель КФТИ А.А. Калачев
6. Молодой ученый-астрофизик Д.А. Бадьин
7. Профессор Университета Оттавы Пол Коркум принимает поздравления
8. Научный сотрудник ИКИ РАН член-корр. РАН Е.М. Чуразов
9. Научный сотрудник Института фотоники Кансая (Япония) А.С. Пирожков (слева) и декан факультета фотоники и оптоинформатики университета ИТМО С.А. Козлов (справа)





1. Научный доклад: полная концентрация
2. Антон Шутов (Российский квантовый центр) и Марлан Скалли
3. Академик А.Г. Литвак (слева) и профессор Харальд Шнайдер (Германия)
4. Руководитель совместной лаборатории РКЦ и ФИАН А.В. Акимов (слева) и А.С. Пирожков
5. Пока ученые мужи обсуждают науку, их прекрасные половины занимаются рукоделием



**ПОЛ КОРКУМ,
ПРОФЕССОР ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА
УНИВЕРСИТЕТА ОТТАВЫ (КАНАДА):**

— Доктор Коркум, как вы оцениваете такой формат встреч — конференция на пароходе?

— Я давно слышал о подобных конференциях, но это моя первая поездка. Идея провести встречу на теплоходе прекрасна, поскольку мы здесь все вместе, в одной лодке, причем в буквальном смысле. Это отличный формат для проведения встреч.

— У вас была возможность осмотреться, полюбоваться видами? Или вы целиком погружены в науку?

— Организаторы устроили для нас экскурсии в каждом из городов, где мы останавливались, и это было очень интересно и познавательно.

Я был в России много раз, но в Поволжье впервые. Мне доводилось много читать о России, и у меня сложилось впечатление, что перемены, которые в ней происходят последние 25 лет, в основном касаются Москвы и Санкт-Петербурга, где я бывал неоднократно. Но оказалось, что перемены гораздо шире. Нижний Новгород мне очень понравился, как и Казань и другие города, где мы останавливались. Каждый из них выглядит очень европейски. Я впечатлен.

— У вас должны быть давние связи с нашей страной. С чего все началось?

— После получения докторской степени я присоединился к Национальному научно-исследовательскому совету. Советские ученые были у нас частыми гостями, и это происходило на более или менее постоянной основе. Они приезжали на сроки от шести месяцев и работали в области лазерной физики. Это направление всегда было очень сильным и в России, и в Канаде. Кроме того, советскому ученому было сложно в те годы приехать в США, а у Канады и СССР была программа обмена. Так что я знал многих советских ученых того периода. Со временем ситуация в СССР стала меняться и меня стали приглашать на встречи за железный занавес. Первая моя поездка состоялась в 1985 г.

— Что произвело на вас наибольшее впечатление во время той поездки? Вы обнаружили что-то, чего не ожидали увидеть в этой стране?

— Поездка была очень эмоциональной, я никогда ее не забуду — я снова повидался со своими друзьями. Я приехал в Москву, где у нас проходила конференция. Со многими участниками я был знаком лично, с другими — по их научным трудам. Но последний день моей поездки стоит выделить особо. Это была годовщина Бородинской битвы. И в тот год на Бородинском поле проводилась реконструкция сражения. Прекрасный день и замечательная поездка. На обратном пути нас сопровождал салют в Москве. Это было поистине завораживающее зрелище!



— Удалось ли во время тех визитов наладить научные связи?

— К моменту моей первой поездки у меня уже были достаточно глубокие научные связи. После распада СССР к нам из России стали приезжать молодые ученые, которых я до этого не видел. Многие приезжали в нашу лабораторию на короткие сроки — от трех до шести месяцев. Один из них в итоге устроился в Национальный научно-исследовательский совет и работал со мной много лет над аттосекундными проектами, которые принесли известность и ему, и мне.

— О чем вы говорили на нынешней конференции?

— Это очень открытое мероприятие, и я могу выбрать практически любую тему, которую хочу обсудить. Я решил рассказать об исключительно интересном проекте, которым сейчас занимаюсь. Не думайте, что я оставил работы по аттосекундным импульсам или считаю их менее важными. Наоборот, основные идеи аттосекундной науки сейчас развиваются в сторону физики твердого тела, аттосекундные импульсы теперь применяются гораздо шире. А на конференции я выступал

с новой идеей. Она заключается в том, чтобы генерировать очень короткие и интенсивные магнитные импульсы. Сейчас это сделать невозможно, но, мне кажется, я знаю, как этого достичь. Более того, я знаю, как сделать эти импульсы очень интенсивными. Я сейчас крайне увлечен этой идеей и решил воспользоваться шансом, который мне предоставили, чтобы рассказать о ней.

— А нам расскажете?

— Сначала я объясню, что это такое. Сейчас мы генерируем магнитные поля, пропуская ток через провод, закрученный в виток или множественные витки — катушки. Электрический ток создается подаваемым на контакты напряжением. Это накладывает ограничения на скорость и силу магнитного поля, которые мы можем создать.

Первый вопрос: зачем подавать напряжение на контакты? Можно ведь создать электрический ток оптическим методом в полупроводнике, используя идеи квантового управления — процесса, в котором световое излучение двух разных цветов создает движение электронов и дырок в заданном направлении. Второй вопрос: зачем нам нужен виток провода? Мы можем сгенерировать такой оптический импульс, чтобы электроны и дырки, которые мы создаем, закручивались в виток без всяких проводов.

Если пустить ток через провод, это накладывает ограничения по силе тока и жесткие ограничения по скорости включения. Но если мы создадим ток в таком виртуальном витке, ограничения становятся совершенно другими. Однако и здесь они есть — и по силе тока, и, соответственно, по силе магнитного поля, которое мы можем сгенерировать.

Но, оказывается, этот же процесс может происходить при пробое газа, при этом нет никакого повреждения материала. Более того, мы как раз и используем плазму (по сути, поврежденный материал) для движения электронов. Пробой газа позволяет нам включать магнитное поле очень быстро и, возможно, делать магнитные импульсы весьма интенсивными. Я думаю, теперь это станет новым способом генерации крайне интенсивных магнитных импульсов и единственным способом сделать их одновременно очень быстрыми и интенсивными.

— А зачем это нужно?

— Самое очевидное применение — управление магнитным материалом. В компьютерах информация хранится на магнитных носителях. И скорость, с которой мы сможем переключать направление магнитных доменов, определяет скорость записи в память компьютера. Это большой вопрос. Существует ли ограничение скорости чтения и записи? Есть некоторые признаки, указывающие на существование такого лимита, но его трудно измерить. Я в своем докладе здесь предложил кардинально новый способ измерения скорости чтения и записи на магнитные носители. Разве не здорово было бы увеличить быстродействие компьютерной памяти в сотни, а то и в тысячи раз?

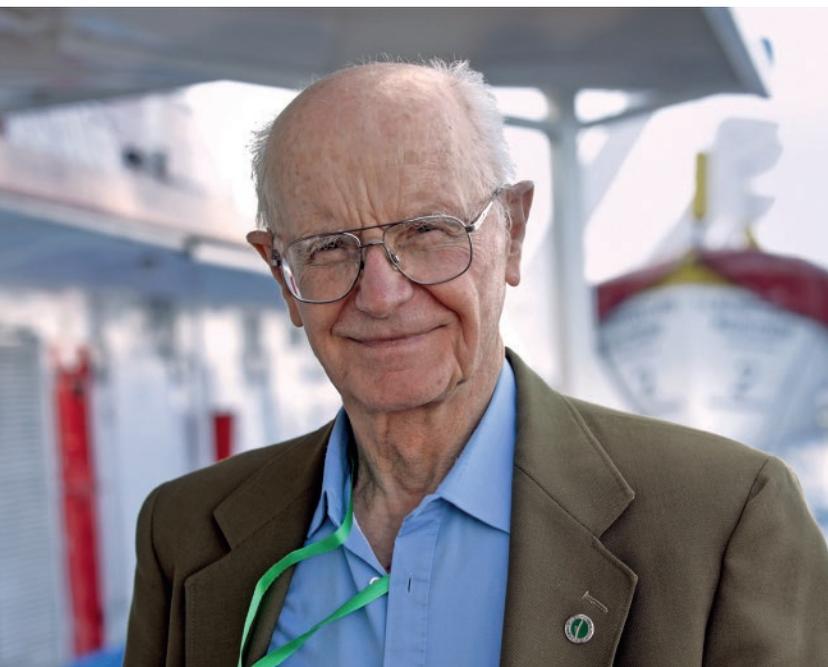
— Это было бы прекрасно!

— Есть и другие применения, помимо магнитных доменов, где эти импульсы могли бы сыграть важнейшую роль, но самое очевидное я только что рассказал. Можно также подумать об ускорении вашего смартфона. Но никогда заранее не предскажешь, куда новые технологии могут привести. В этом и красота фундаментальной науки — в мире столько умных людей, и очень сложно предугадать долгосрочный эффект какого-то открытия в фундаментальной науке. Мы можем лишь открыть новый путь. Именно это мы и сделали в аттосекундной науке примерно 25 лет назад.

**МАРЛАН СКАЛЛИ,
ИНОСТРАННЫЙ ЧЛЕН РАН
(США), ПРОФЕССОР ТЕХАССКОГО
И ПРИНСТОНСКОГО УНИВЕРСИТЕТОВ:**

— Доктор Скалли, как вы оцениваете формат проведения конференции на корабле?

— Превосходно! Это очень стимулирует. Первый раз на такой конференции я был много лет назад, и она оказалась настолько продуктивной, что я написал статью «Квантовая оптика на Волге». С тех пор я много раз бывал в России.



Здесь мы общаемся с друзьями и коллегами, знакомимся с интересными городами, а главное, имеем прекрасную возможность говорить о физике. Как это может не нравиться?

— Когда вы приехали в Россию в первый раз?

— Я вырос в штате Вайоминг, это американский аналог Сибири. Впервые я приехал в Россию примерно в 1970 г., как раз в Новосибирск, самое сердце Сибири. Я был восхищен советской наукой. Мне довелось общаться с блестящим физиком Владиленом Летоховым, которому принадлежит идея охлаждения атомов лазерным излучением, с други-



А.Г. Литвак и Марлан Скалли выступают на пленарном заседании

ми выдающимися учеными — Николаем Басовым, Александром Прохоровым, Леонидом Келдышем. Его мне даже посчастливилось принять на работу в Техас. Вообще, нашу команду Техасского университета пополнило такое количество замечательных российских коллег, что наш городок в шутку называли Москвой на реке Бразос. На протяжении XX в. Советский Союз уделял огромное внимание образованию, и, безусловно, мы должны расценивать вклад СССР в мировую науку как очень серьезный. Ваша страна произвела несколько поколений блестящих ученых.

— В своем вступительном слове вы продемонстрировали завидное чувство юмора. Оно помогает в вашей научной жизни?

— Наука — это отличная возможность заниматься тем, что доставляет удовольствие и в то же время представляет собой важное дело. Все наши открытия могут улучшить качество нашей жизни. А еще наука приносит в нашу жизнь радость. В коридорах моего института постоянно слышен смех. Великий физик Нильс Бор всегда говорил, что квантовая механика — очень странная наука: если ты в ней не запутался, значит ты ее не понимаешь. Нильс Бор и Альберт Эйнштейн обладали превосходным чувством юмора. Бору приписывают авторство знаменитой фразы: «Очень сложно делать прогнозы, особенно в отношении будущего». Эйнштейну категорически не нравилась вероятностная природа квантовой механики, и он говорил по этому поводу: «Я не могу поверить, что Бог играет в кости со Вселенной», на что Бор ему однажды заметил: «Альберт, не указывай Богу, что делать!»

Умение видеть абсурдную сторону вещей очень важно, и в этом есть определенный талант. Я уверен, что даже в серьезных открытиях нужно уметь видеть юмор и получать от этого удовольствие. Как говорил Нильс Бор, квантовая механика — это такой предмет, где присутствует глубокая правда, а полная противоположность глубокой правде — еще одна глубокая правда. Подобные высказывания помогают нам лучше понимать природу многих вещей.

— Над чем вы работаете в настоящий момент?

— Сейчас я работаю над проблемой физики черных дыр и квантовой оптики. Оказывается, многие идеи касательно излучения Стивена Хокинга и физики черных дыр имеют непосредственное отношение к квантовой электродинамике, если рассматривать излучение как нечто, испускаемое атомами, подверженными огромным ускорениям. И на самом деле это проблема квантовой оптики. Знаменитый физик Билл Унру, впервые высказавший эту мысль, приезжает к нам в Техас для совместной работы над этой темой. Атомы ускоряются, попадая в черную дыру, и в результате этого ускорения возникает излучение. А где есть свет, там вступает в дело квантовая оптика. Получается такой интерфейс с физикой черных дыр. Это лишь один пример того, над чем мы работаем.

С другой стороны, мы работаем над методами исследования болезней. Мы ищем способы пропуска света сквозь размытую среду типа ткани человеческого организма. То есть лазерные технологии теперь используются в новых направлениях биофизики и биофотоники. ■

Подготовил Виктор Фридман



«МЫ ЗДЕСЬ СПАСАЕМ КРАСОТУ, А КРАСОТА СПАСАЕТ НАС»

В прошлом номере мы рассказали о Межакадемическом совете Российской академии наук и Национальной академии наук Беларуси, прошедшем в Петрозаводске на базе Карельского научного центра РАН. Однако поездка в Карелию для нашей группы не ограничилась освещением форума академиков Союзного государства, потому что приехать в Петрозаводск и не посетить жемчужину Русского Севера — Государственный историко-архитектурный и этнографический музей-заповедник Кижы — просто нельзя.



Председатель Карельского научного центра РАН доктор биологических наук, член-корреспондент РАН О.Н. Бахмет

Перед поездкой на остров удалось побеседовать с председателем Карельского научного центра РАН доктором биологических наук, членом-корреспондентом РАН Ольгой Николаевной Бахмет. Вот что она рассказала:

— Изначально архитектурный заповедник в Кижях создавался на основе исследований историков. И сейчас, когда заповедник превратился в культурный объект и центр притяжения туристов, наш научный интерес прежде всего остается в плоскости изучения и сохранения истории Русского Севера. Но этим значимость Кижей и для нашего КарНЦ, и в целом для российской и мировой науки не исчерпывается. Важное прикладное значение имеют экологические исследования, связанные с разрушением древесины. Много информации нашим ученым дает изучение влияния на состояние окружающей среды усиленного туристического потока; как на нее воздействует загрязнение, связанное не только с самими туристами, но и с большими кораблями, которые ежедневно подходят к острову. В этой области у нас развивается несколько международных проектов.

Сам остров Кижь интересен и как уникальный природный объект. Благодаря своему положению он имеет совершенно исключительный микроклимат. На острове значительно теплее, чем на в других точках Карелии, расположенных на той же широте, здесь встречаются редкие виды растений, животных и т.д. Когда у нас в Петрозаводске в 2012 г. проходил съезд почвоведов, мы привозили сюда большую группу ученых. Оказалось, почвы, которые здесь образуются и в естественном процессе, и в результате сельхозработ, не ложатся

ни в российскую, ни в международную классификацию. Они так же уникальны, как и сам остров Кижь, который сложен шунгитовыми сланцами. В КарНЦ три лаборатории занимаются их изучением. Тут до сих пор много загадок. Отобранные на сравнительно небольшом расстоянии друг от друга образцы сланцев зачастую имеют различный химический состав, пока непонятно, как они формировались, не до конца изучены свойства. Наши ученые проводили совместные исследования с коллегами из Санкт-Петербургской Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова и нашли ряд положительных медицинских свойств дисперсного вещества шунгита. Так, например, он хорошо помогает при заживлении ран. Поэтому остров Кижь для нас интересен, важен и един в трех ипостасях: как природный, исторический и туристический объект.

ВЫШЕЛ ИЗ ЛЕСОВ

— А вы знаете, когда в Кижях лучше всего? — спросила старший научный сотрудник музея-заповедника М.В. Кистерная, показывавшая нам главные объекты.

— Весной, наверное, когда все цветет.

— Нет. Лучшее всего в Кижях, когда нет туристов. — Зимой?

— Зимой здесь поток ненамного меньше, чем летом. А туристов нет вечером. Все уехали, ты выходишь на берег, смотришь на небо и понимаешь, что между тобой и космосом нет вообще ничего.

Сейчас в музее важная пора, идут заключительные работы одного из самых грандиозных в его истории проектов: реставрации построенной более трех веков назад 22-главой деревянной церкви Преображения Господня. Можно сказать, что работы начались еще в начале 1980-х гг. Тогда существовал реальный риск того, что древние бревна, из которых сложен нижний восьмерик, не выдержат более чем 600-тонной нагрузки и здание просто рухнет. Церковь закрыли для посещения туристов, разобрали иконостас, полы, «небо» (храмовый потолок), а взамен собрали внутри огромный поддерживающий металлический каркас. После чего работы почти прекратились на долгие 25 лет.

Проект комплексной масштабной реставрации храма был разработан Санкт-Петербургским институтом «Спецреставрация» только к 2001 г., сами же работы начались в 2006 г. Было решено не разбирать церковь полностью, а разбить ее на семь поясов-уровней и заниматься с каждым отдельно. В сущности, храм все это время не стоял на земле, а висел на своем металлическом скелете. Реставраторы же разбирали сначала верхние пояса, исследовали бревна, пришедшие в негодность, меняли на новые, методом лифтинга вновь собирали

конструкцию и потом тем же лифтингом «подтягивали» к верхним перебранным поясам нижние.

На то, чтобы обследовать, вылечить или замечить бревна — а их в конструкции больше 3 тыс., — ушло 13 лет. Наконец в марте над храмом установили последнюю главу, в апреле сняли окружавшие его леса, а в мае демонтировали почти весь металлический каркас. Оставили лишь небольшую часть для страховки исторических фрагментов трехвекового пола.

— Леса разобрали так быстро, — рассказывает М.В. Кистерная, — что, увидев в один прекрасный день храм без них, мы испытали такой же культурный шок, какой, наверное, испытали крестьяне Кижского погоста, когда больше 300 лет назад, в 1714 г., увидели новую церковь. Этот шок у нас и до сегодня еще не совсем прошел, мы окончательно так и не осознали, что произошло. Плотник, водрузивший над центральным куполом крест, рассказывал, что там, наверху, ему одновременно хотелось и плакать, и смеяться. Было непонятно, какие гиганты строили такие церкви. А вот такие, как мы.

Теперь реставрационные работы перешли внутрь храма. Там вновь собирают полы, иконостас, «небо». Если ничто не помешает, реставрация будет завершена летом 2020 г. А 19 августа, в день великого праздника Преображения Господня, Патриарх Московский и всея Руси освятит воссозданный храм.

ДОЛГОСТРОЙ

Когда на Кижях возникли первые церкви, нам точно неизвестно. Неизвестно и какими они были. Скорее всего, шатровыми и не многоглавыми, поскольку в писцовых книгах 1563 г., где они упоминаются впервые, сказано, что «церквы» здесь «клецкие», то есть прямоугольные. Преображенский храм был построен на месте одноименной церкви, сгоревшей в 1694 г.

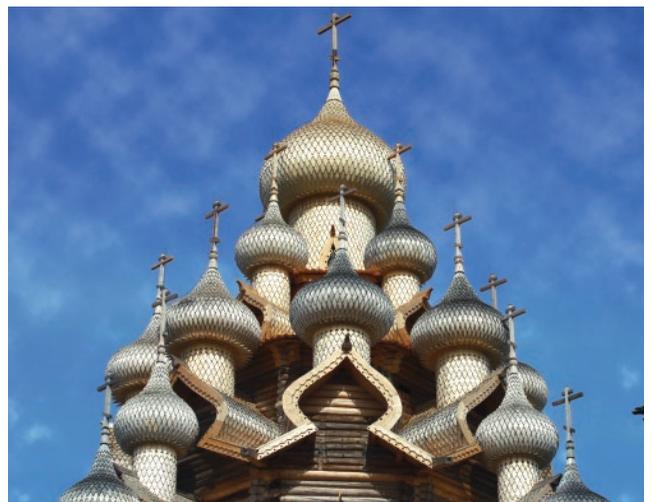
В Кижский погост тогда, три века назад, входило около 130 деревень, в которых жили достаточно зажиточные крестьяне. Новую церковь строили всем миром. В качестве основных подрядчиков пригласили (по всей видимости) артель, которая уже к тому времени прославилась строительством 25-главой церкви Покрова Пресвятой Богородицы в селе Анхимове под Вологодой. К сожалению, та Покровская церковь до наших дней не сохранилась, она сгорела в 1963 г. «по причине преступной небрежности». Однако если судить по оставшимся фотографиям, сходство несомненное.

К сожалению, имена артельщиков до нас не дошли. Остались только легенды. Согласно одной из них, в Кижях руководил работами мастер Нестор. Закончив строительство, он оглядел церковь и сказал: «Не было, нет и не будет такой!» После чего забросил свой топор в Онегу. В случае

с Покровской церковью легенда рассказывает другое — что построил ее никакой не Нестор, а неизвестный голландский архитектор, а эскиз нарисовал сам царь Петр I. Якобы царь, будучи в этих местах, в гневе приказал казнить сына местного богатого крестьянина Плотникова за то, что тот нагрубил присланному от царя за лошадьми сержанту. Несмотря на слезные мольбы отца, просившего пощадить сына и обещавшего отдать за то в казну все состояние, приказ был приведен в исполнение. Крестьянин же решил тогда направить то же состояние на то, чтобы построить на месте казни дивной красоты храм. С просьбой о разрешении на это Плотников обратился к еще не уехавшему государю. На этот раз Петр принял его благожелательно и не только разрешил строительство, но и соизволил собственноручно набросать контур будущей церкви. Ни та ни другая истории не подкреплены никакими материальными доказательствами, поэтому для историков они так и остаются не более чем легендами.

Вряд ли неизвестные гении деревянного зодчества, даже видя несомненную красоту созданного, предвидели, что спустя неполных 300 лет построенная ими церковь будет объявлена гордостью не только Заонежья, не только Русского Севера, но и всего мира, а посмотреть на нее будут съезжаться люди из самых далеких стран.

Справедливости ради стоит сказать, что облик объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО Кижского погоста формировался более 250 лет. И первым памятником стала не большая Преображенская, а стоящая совсем рядом, практически вплоты, маленькая Покровская церковь. Ее построили сразу после пожара, в 1695 г., и она считается церковью зимней. Церкви на Руси отапливаемыми никогда не были, печей в них не ставили, и служить



Настоящая жемчужина Кижей — деревянная о 22 куполах церковь Преображения Господня, построенная более трех веков назад



В кижских домах почти все вещи подлинные, оставшиеся от реальных хозяев

зимой в большом храме было достаточно проблематично. Поэтому рядом с большими обычно ставили маленькие, в которых даже при небольшом числе прихожан и даже в лютый мороз было тепло и уютно. Хотя правильнее было бы сказать иначе: большой храм ставился рядом с маленьким, поскольку маленький было строить и проще, и быстрее. Построили, освятили, и дальше уже можно приступать к более солидному и долгому строительству. Так вышло и здесь. Сначала в Кижях построили маленькую Покровскую церковь, а спустя 19 лет рядом с ней — большую Преображенскую. Надо сказать, что построили вовремя, поскольку уже в 1722 г. Святейший Синод издал указ, запрещающий строительство новых и служение в старых деревянных храмах. В принципе, кижские крестьяне должны были разобрать свою красавицу, но, конечно, никто этого делать не стал. К счастью, в отношении этого указа российское правительство было достаточно лояльным, и если деревянный храм не был прибежищем староверов, смотрело на служение в нем сквозь пальцы.

В 1800 г. вологодские купцы Терсковы уложили вокруг двух церквей каменное основание для ограды. Однако дальше дело не пошло, да это и понятно: от кого отгораживаться, когда чужие здесь не ходят?

В 1862 г. на месте старой, обветшавшей шатровой колокольни крестьяне всем миром построили новую. В уездных документах отмечено: «...во время постройки колокольни всем приходом помогли срыть старую колокольню, очистить место, доставить камень и песок для фундамента, выкорить лес и доставить оный к месту постройки, и десять человек и более плотников и пильщиков кормили хлебом и пр.». Новая колокольня была несколько смещена в сторону ограды и смотрелась отдельным, слабо связанным с храмом строением. Видимо, это не понравилось крестьянам, и они запросили разрешения на ее перестройку, какое им дали в 1874 г. Новый проект в соответствии с пожеланиями местных жителей составил городской архитектор Илья Копошев, а воплотил его за 205 рублей серебром местный крестьянин Сысой Осипов, который все «плотничьи и столярные работы произвел добросовестно и прочно». Надо сказать, вкус у заонежских крестьян в делах, касавшихся деревянного строительства, был весьма тонким, что признают современные эксперты. По их заключению, изменив пропорции четверика и восьмерика, местные топорные мастера подчеркнули высотность основного храма и сделали композицию более гармоничной.

Последней вишенкой на архитектурном торте стала увенчавшая каменную ограду деревянная надстройка. Ее уже можно назвать почти новоделом, поскольку поставили ее уже в 1956 г. Автором стал человек для музея легендарный, его основатель, замечательный советский архитектор и реставратор, почетный член Академии архитектуры А.В. Ополовников. «Здесь обязательно должна быть ограда», — сказал Александр Викторович, и ограда возникла. Эта работа А.В. Ополовникова стала первым в России случаем восстановления ранее не существовавшего памятника. Именно в таком виде Кижский погост был в 1990 г. внесен в список объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО.

ПОРУБИЛИ ПО СУСЕКАМ

Реставрация — всегда компромисс между тем, что должно быть сделано, и тем, что можно сделать. Сами реставрационные работы, как бы и кто ни старался, всегда неизбежно приводят к некоторой потере историчности. Исчезают исторические материалы, следы рук древних мастеров.

— Когда мы приступили к реставрации, — рассказала М.В. Кистерная, — столкнулись с проблемой поиска необходимой древесины. Казалось бы,

лесов в нашей стране миллионы гектаров, а тут нужно всего несколько сотен бревен, так в чем сложность? А в том, что нужна особая древесина, максимально соответствующая исторической. Об этом просили все правила и нормы. Но 300 лет назад для строительства больших приходских храмов люди выбирали наиболее мощные, а значит, наиболее старые деревья, возрастом 250–300 лет. Для строительства дома можно было брать и 100–150-летние стволы, но для храма критерии выбора были гораздо жестче.

Причина была инженерная. Артельщики знали свое дело и понимали, что молодые мягкие бревна просто не выдержат веса огромного, высотой почти 40 м, многосоттонного здания. Поэтому в нижнюю часть клали очень старые и твердые бревна, с плотностью порядка 600 кг/м³. Выше шли стволы помягче и полегче, с плотностью 450 кг/м³, именно эта древесина составляла основной объем. И, наконец, самый верхний восьмерик был сложен из бревен маленького диаметра и малой плотности. И если с верхними бревнышками проблем не было, то найти деревья возрастом более двух веков для средней, а тем более нижней части было совсем не просто. Почти все старые деревья были давно вырублены.

— Старовозрастные леса у нас сохранились, но в основном на границе и в национальных парках, где вырубка запрещена. В том числе и для

наших целей. Поэтому мы искали участки леса, которые когда-то были просто недорублены по каким-то житейским обстоятельствам. Где-то выполнили план и работы остановили, где-то прошла дорога и отрезала кусок леса, где-то просто не сумели. Выискивали кусочки леса, где можно было заготовить нужную древесину. Заготовили, оказалось, что в ней много повреждений. Но нам удалось отобрать на реставрацию Преображенской церкви бревна, максимально соответствующие историческим. Все миссии ЮНЕСКО, контролировавшие ход реставрации, специалисты, приезжая к нам и видя нижние венцы, задавали один вопрос: «Где вы взяли такой лес?» А вот там и взяли.

КАПЛЯ ДОСКУ ТОЧИТ

В результате реставрации в церкви Преображения Господня удалось сохранить порядка 70% исторического материала. Для деревянного строения с трехвековой историей показатель высокий. Добиться его удалось за счет уникальных технологий лечения бревен, а также за счет того, что, когда была такая возможность, реставраторы старались менять не все бревно, а лишь его поврежденную часть.

С другой стороны, 70% сохраненной историчности автоматически означает, что 30% утеряны безвозвратно. И теперь надо постараться сделать все



Вере было два месяца, когда мама привезла ее на остров. В доме братьев Елизаровых она работает смотрителем-крестьянкой: убирает, прядет, поет. Сейчас — вяжет сеть.

максимально возможное, чтобы эта цифра впредь увеличивалась как можно медленнее. Надо быть реалистом: в отличие от камня дерево отнюдь не относится к вечным материалам. И тут на первый план выходят задачи профилактики. Музеем Кижи в этом очень повезло. Сотрудничество с РАН, с Институтом леса Карельского научного центра и Московским государственным университетом леса вылилось в создание целой системы комплексного профилактического обслуживания памятников деревянного зодчества, которая позволяет следить за состоянием памятников, улавливать очаги разрушения на самой начальной стадии и ликвидировать их современными методами — а значит, сохранять объекты максимально долго. Сохранение деревянных памятников и есть основная задача, которой занимается в Кижах М.В. Кистерная:

— У древесины три основных врага: огонь, вода и человек. Первую проблему решает встроенная современная противопожарная система. За людьми-туристами ведется тщательное наблюдение. С водой все обстоит сложнее. Тут необходимо постоянно соблюдать баланс. Если влажность повышена, в дереве начинают развиваться грибы. Пять-десять лет работы дереворазрушающего гриба — и древесина разрушена безвозвратно. Поэтому первое дело для нас — постоянный контроль влажности древесины.

Датчики влажности устанавливают в потенциально влагоопасных местах и тщательно укрывают от глаз любопытных туристов. Показания с них снимают где-то раз в несколько дней, где-то — раз в неделю, где-то — раз в месяц. Если влажность периодически то поднимается выше средней, то падает ниже — не страшно. Такая ситуация для дерева вполне комфортна. Плохо, когда повышенная влажность держится долго. К таким местам внимание сотрудников особое. Для того чтобы понять, успел здесь поселиться грибок или нет, сотрудники музея устанавливают



в проблемных местах специальные «образцы-свидетели» — тоненькие палочки из свежей древесины. Если спустя некоторое время масса образца уменьшается, значит его «ест» грибок. Изменения более 1% говорят о том, что надо насторожиться, а более 5% — бить тревогу и спасать дерево. Если вовремя принять меры, можно решить проблему с наименьшими потерями.

У нас было подозрение на разрушение бревна косоура (*несущий элемент лестницы. — Примеч. ред.*) Покровской церкви. Установили образец, он за сезон почти полностью разрушился. Демонтировали косоур, а за ним — незаметная течь, и грибок вовсю развивается. В результате удалось спасти бревно, удалив лишь поврежденную часть и ликвидировав течь.

ИЗ ПУШКИ — ПО ЖУКАМ

У проблемы есть и обратная сторона. Стоит древесину пересушить, и в ней может завестись жук-точильщик. Точнее, не сам жук, а его личинки.

— Различные короеды и лубоеды не так опасны, их легко убить ядохимикатами. А личинка точильщика вгрызается глубоко в древесину, ее уже так просто не достанешь. От двух до четырех лет она незаметно живет в дереве и разрушает его изнутри.

Единственный способ избавиться от этого опасного врага — прогреть бревно до 60° С, смертельной для вредителя температуры. Раньше для



1. Датчик влажности важно установить в темном, недоступном для туристов месте
2. В руках у М.В. Кистерной — те самые «образцы-свидетели», по изменению веса которых можно обнаружить в древесине грибы-паразиты
3. Стоит чуть ослабить бдительность, и крохотная личинка точильщика съест целое бревно
4. Антижуковая пушка — местное ноу-хау: микроволновое излучение не только полностью стерилизует древесину, но и делает ее на будущее невкусной для вредителей

этой цели использовали тепловые пушки, однако сама процедура занимала до 30 часов. Сотрудники музея вместе с коллегами из Московского государственного университета леса и петрозаводского Института леса сократили это время до 5,5 часов, заменив тепловое излучение микроволновым. Надо признать, что в этом они не были первыми: микроволновые пушки для прогрева проблемной древесины уже выпускались, в частности в Германии. Но у них был существенный недостаток: нагрев преимущественно происходил в одной небольшой области либо в узкой полосе. Распределить его равномерно по большому участку было сложно. В Кижях проблему решили довольно изящно, добавив в рупор излучателя антижуковой пушки поворотную антенку-рассеиватель.

Теперь процесс выглядит так: пушка крепится рупором излучателя к обрабатываемому объекту. Примерно за четыре часа древесина равномерно прогревается до 53–55° С и дальше выдерживается примерно полтора часа, после чего пушка снимается и переносится в новое место. Такую обработку древесины в Кижях начали проводить десять лет назад, после чего проблема точильщика почти сошла на нет. Дело в том, что такая антижуковая пушка дает не только сиюминутный тактический, но и почти вечный стратегический эффект: при таком нагреве, помимо уничтожения вредителя, в древесине выделяется большое количество смолы, которая заполняет поры и делает дерево несъедобным для точильщика.

Нам повезло: в день, когда мы посетили Кижы, на остров, кроме рейсовых «Комет», пришли лишь два больших круизных лайнера. Вообще, их здесь в день нередко бывает семь, а иногда и больше. За все время мы встретили только четыре группы туристов: китайскую, немецкую, японскую

и русскую. На разбитых между историческими деревянными памятниками огородах работали люди. Оказалось — сотрудники музея.

— У нас здесь все сотрудники — универсалы. Вот я сейчас с вами побеседовала, потом пойду снимать показания с датчиков, потом, если реставраторы не попросят помочь, возьму туристическую группу как экскурсовод.

— Скажите, а бывает так, что человек приехал сюда в составе туристической группы и остался?

— А вы что, уже примеряетесь? Наш отдел кадров всегда открыт для сотрудничества, работы много, хватит на всех. На самом деле именно так и бывает: люди приезжают сюда на несколько часов, а уехать не могут. Как будто какая-то сила их держит. Кто-то на месяц остается, кто-то — на полгода, кто-то — на всю жизнь. Ведь если правду говорят, что красота спасет мир, то Кижы как раз и есть такой уже действующий островок спасения. Мы здесь спасаем красоту, а красота спасает нас.

В следующем номере мы расскажем, чем сотрудники Института биологии КарНЦ собираются вдоволь накормить мальков лососевых рыб, чтобы затем вдоволь накормить красной рыбой россиян, и как в Институте леса КарНЦ клонируют знаменитую своей уникальной древесиной карельскую березу. ■

Подготовил Валерий Чумаков



**ИНОСТРАННЫЙ ЧЛЕН РАН
ГЕРМАН ПАРЦИНГЕР:**

«ГРАНИЦ НЕ

Немецкий археолог **Герман Парцингер**, создатель Евразийского отделения Германского археологического института, специалист по скифской культуре и одновременно президент Фонда прусского культурного наследия, не так давно стал иностранным членом Российской академии наук. Что привело его к столь экзотической для немецкой археологической школы теме? Какие находки профессиональные археологи считают самыми важными? Насколько заинтересованы нынешние молодые люди в изучении прошлого? Какова роль музеев в современном мире? И что думает глава крупнейшего в Германии музейного объединения о проблеме перемещенных культурных ценностей?

An aerial photograph showing a paved road cutting through a green, grassy field. A small, dark, rectangular structure is visible on the right side of the road. The terrain appears to be a mix of grass and bare earth, possibly an archaeological site or a rural area.

Курган Аржаан-2 (Долина царей) — захоронение скифского вождя второй половины VII в. до н.э. в Пий-Хемском районе Республики Тыва. Диаметр — 80 м, высота — 2 м. Впервые исследован в 1997 г. Раскопан в 2001–2003 гг. российско-германской экспедицией (А.О. Наглер, Герман Парцингер, К.В. Чугунов).

НАУКА И ОБЩЕСТВО

СУЩЕСТВУЕТ»





Иностраннный член РАН
Герман Парцингер

— Часто приходится слышать, что практикующим археологам стоит обратить внимание на обработку того материала, который уже есть, найден и лежит в хранилищах, а полевые исследования следует ограничить. Вы разделяете эту точку зрения? Или считаете, что нужно как можно больше новых находок?

— Хороший вопрос! В фондах действительно есть масса материалов — и в России, и в Германии. Их очень много, потому что копали интенсивно и широкими площадями, например при крупном строительстве, а времени анализировать эти находки не было. И эти материалы ждут своих исследователей, потому что нельзя же их игнорировать. К тому же сейчас мы располагаем новой научной методикой исследований. Например, активно используется палеогенетика. Появились новые методики по анализу изделий из металла и камня, которые могут дать интереснейшую информацию, скажем, о древней меновой торговле, о настоящих трансконтинентальных торговых путях. Странно было бы не применить эти методы к тем предметам, которые хранятся в фондах. С другой стороны, есть масса информации, которую можно получить, только если копаешь. Так что, я думаю, здесь надо искать компромисс.

— У нас люди обычно воспринимает археологию как поиск находок, причем желательно, чтобы было много золота и драгоценностей. Словом, охота за сенсацией. В Европе это тоже так?

— Я думаю, это везде так. Газеты о тебе напишут и телевидение тебя покажет, только если ты найдешь отлично сохранившуюся мумию или золото. Однако малозаметные находки в работе археолога на самом деле важнее, чем любые драгоценности, потому что они помогают нам реконструировать

прошлое, демонстрировать новую, живую и объемную картину того времени. Скажем, те же палеогенетики работают со скелетами, с костями. Казалось бы, никакого блеска и сенсаций. Но какой результат! Для меня результат — сенсация. И это уже задача СМИ: показать, что археология — не просто приключения Индианы Джонса и поиск драгоценностей. Правда ценнее любого золота, а археология может показать именно историческую правду. Я, между прочим, уверен, что массового зрителя это может интересовать по настоящему.

— Показателем такой заинтересованности можно считать и студентов, которые выбирают специализацию «археология». Таких сейчас хватает? И что их приводит к такому решению — тяга к науке или приключениям?

— Я читаю лекции в Берлинском университете, так что могу засвидетельствовать: студентов много. И мне кажется, что ими, как правило, движет интерес к истории. К тому же не будем забывать, что археология — наука мультидисциплинарная. Для многих студентов она интересна именно этим. Что такое история как таковая? В основном, работа с документами, письменными источниками, то есть библиотеки и архивы. А археология — это и металлургия, и геофизика, и палеоботаника, и палеозоология, и палеогенетика — я могу долго перечислять все эти «и»... и романтика, конечно же. Но она заканчивается примерно через год, потому что приходит понимание: если ты действительно интересуешься археологией, придется много работать. Экспедиция, работа в поле — это не пикник где-нибудь в Греции, на берегу моря, с вином и легкими перекурами на приятное обмахивание кисточкой только что найденного мраморного шедевра. Это часто дожди, морозы, неустроенность и тяжелый труд

на износ. В поле у нас нет понятия «вечер». Работать по 14–15 часов в сутки — нормальная ситуация.

Та же самая скифская «Долина царей», Тыва, Алтай... Первая экспедиция, совместная работа с Институтом археологии РАН в 1996 г. больше всего напоминала авантюру. В июне и даже в июле шел снег! Ночью — мороз. Романтика! Мы тогда не искали сенсацию. Настоящему археологу это вообще не к лицу. Для нас настоящей сенсацией стала не просто находка мумий. Нас поразило богатство материала — археология плюс этнография. Внизу, в долинах, курганы содержали в основном кости. Ну и, разумеется, типичные находки — железные кинжалы, такие или очень похожие бытовали во всем скифском мире.

Никаких интересных выводов тут не сделаешь. Есть тысячи таких. Конский убор? Горшки? Все уже было, и во множестве. Но потом, работая по плану, мы добрались до кургана с мерзлотой. Тут была шуба! Была шапка! Деревянные украшения, кожаные вещи... Вообще сохранилась вся органика, в том числе и сам погребенный с татуировками на теле. Вот где настоящее богатство! После той находки я по-новому взглянул на «бедные» курганы — в них, скорее всего, было то же самое. Получилось маленькое, но настоящее окно в огромный потрясающий мир скифов.

Сотни больших курганов и тысячи маленьких. Действительно, «Долина царей». Раскопки там обязательно надо продолжать. Работы там как минимум на десятилетия, а то и на поколения ученых. Надо копать могильник целиком, делать генетический анализ. Ведь в каждом кургане лежат люди. И нам следует выяснить их родственные связи. Была ли у них единая династия? Если была, это уже принципиально иной уровень развития общества, где понимают ценность наследственной власти. На эти вопросы может дать ответ палеогенетика. Пусть даже некоторые курганы давно ограблены, пусть находок будет мало, неважно. Важно то, что мы найдем останки, кости и сделаем анализ.

— Вы отправились в первую свою сибирскую экспедицию целенаправленно? Честно говоря, немного странно, что немецкий археолог вдруг начинает так увлеченно заниматься скифами...

— Если вы спрашиваете конкретно о Тыве, могу сказать так: я туда поехал только по той причине, что там проводил раскопки глубоко почитаемый мной русский археолог М.П. Грязнов, который там копал в 1970-е гг. Ему удалось обнаружить самые древние скифские предметы. Другое дело, что он копал курган, который был разграблен в прежние времена. Поэтому я хотел просто посмотреть это место. Даже и мечтать не мог о том, что буду там копать сам.

Сибирь меня интересовала всегда. Археология в Германии занимается изучением разных эпох и культур. Разумеется, преимущественно в Европе. Но нас всегда крайне интересовало, что происходило там, на востоке, в степях. И это вполне естественно — те же скифы вышли как раз оттуда, с просторов Великой степи, и дошли до Центральной Европы. В Польше, Чехии, Венгрии, Восточной Германии есть находки, относящиеся к скифам. Это был, так сказать, конец их пути. А начало, прародина скифов — у вас, в России. И чтобы понять историю Европы, надо понять и историю Великой степи — это типичное рассуждение нашей археологической школы.

Ведь по большому счету все это пространство и есть Европа. Если от Германии смотришь на восток, то видишь, что границ нет. Я не о политических границах — они, конечно существуют. Но нет границы культурной. Кстати, те же скифы, которых у вас с легкой руки поэта Александра Блока считают азиатами «с раскосыми и жадными очами», были европейцами. Вся Центральная Азия была тогда населена европейцами. И для меня русские — это безусловная часть европейской семьи народов, а Россия — неотъемлемая часть Европы. Я вообще не могу себе представить европейскую культуру без русской. Художники, музыканты, писатели... Европа без русских невозможна, немыслима! Знаете, все те 20 лет, что я работаю в России (с середины 1990-х гг.), мы были бок о бок с вашими специалистами как партнеры и как друзья. И это не только совместные экспедиции — многие мои студенты, например, делали кандидатские работы по российской тематике.

Так что археология — это международная наука. Может быть, даже самая международная. Потому что в те времена, которыми занимаюсь я, границ попросту не было.



Герман Парцингер (справа) с вице-президентом РАН Н.А. Макаровым

— Да, но сейчас-то они есть! И не секрет, что археология иногда используется как средство доказательства в политической борьбе, даже как обоснование территориальных притязаний...

— К сожалению, это так. Да, археологию могут использовать нечистые на руку политики. Классический пример: в 1930-е гг. в Германии нацисты с помощью слишком вольных интерпретаций археологических находок стремились показать, что Южная Россия и Украина — это древнегерманские территории, на том основании, что там когда-то проживали древнегерманские племена. Да, проживали, но именно племена — в эпоху поздней античности! Современные немцы с теми племенами имеют мало общего. Немцы, если посмотреть на историю, суть не что иное, как результат сотен миграций — крупных и помельче масштабом. В формировании нации участвовали германские, кельтские, славянские племена... И потому археологу очень важно показать, как формировался народ, как формировались культуры. История — это организм, который всегда в движении. А политики, используя археологию в своих целях, хотят показать, что их народы — самые древние, самые культурные, самые развитые и напрямую

наследуют знаменитым древним племенам. Но это же неправда! Все намного сложнее, и о прямой преемственности говорить нельзя. Поэтому для археологов очень важно найти правду и восстановить настоящую историю.

— Представляю, как на вас накинутся люди, далекие от академической археологии, но любящие простые ответы. А то и разнообразные байки, скажем, о том, что пирамиды построили инопланетяне или что Стоунхендж возвела цивилизация атлантов. В России таких довольно много. А в Германии с ними часто приходится сталкиваться?

— Чаше, чем хотелось бы. Стабильно раз или два в неделю я получаю электронное письмо, как правило, очень длинное — такие энтузиасты не умеют писать коротко. У них какой-то горячий интерес, который требует выплеска. И они присылают мне свои идеи — очень странные. Иногда я им отвечаю. Объясняю, что ничего подобного не могло быть в силу самых разных объективных причин — начиная от степени развитости, скажем, металлургии и заканчивая элементарным земным притяжением. Но в результате от них приходят еще более длинные письма, где выдвигаются совсем уже фантастические версии. Для многих людей это



Герман Парцингер (справа), академик В.И. Молодин (в центре) и старший научный сотрудник Института археологии и этнографии СО РАН И.Ю. Слюсаренко на раскопках могильника Олон-Курин-Гол-6 в Монголии, 2006 г.

становится чем-то вроде зависимости. И такая ситуация везде одинакова: Россия, Германия, Перу — неважно.

Дело в том, что археология не дает готовых ответов. Каждую находку, ситуацию приходится обдумывать. Те же пирамиды — сам факт их наличия вызывает вопросы. Какое общество могло их построить? Какой там была власть? Какие технологии?

То же самое касается и скифских курганов. 100 м диаметром и 12 м в высоту — это, можно сказать, пирамида в степях. Это значит, что существовала система общества, при которой такое строительство было возможно. Например, был вождь, который скажет: «Брось дом, хозяйство и давай работай! Надо строить царский курган!»

В общем, все надо интерпретировать. Но каждое следующее поколение археологов думает, что оно умнее предыдущего и его интерпретация — самая верная.

А интерпретация — это всегда немножко фантазии, немножко допущения. Разумеется, люди, которые не имеют образования, но имеют доступ к результатам раскопок и документации, начинают выдвигать свои версии. Это нормально.

— Кстати, если уж речь зашла об образовании. Вы уже много лет возглавляете Фонд прусского культурного наследия, куда входит внушительный корпус немецких музеев, архивов и библиотек. Какова роль музея в современном мире и в образовании?

— Она чрезвычайно важна. И переоценить я не боюсь. Вот вы спрашивали про результаты раскопок, интерпретацию, любовь к простым ответам и фантазиям... Если мы хотим, чтобы люди знали правду, надо наладить какие-то каналы трансляции между учеными и обществом.

Да, есть телевидение, документальные фильмы. Это очень хорошо, это бывает и правдиво, и зрелищно, и увлекательно, но канал слишком мелкий. Вы же знаете, что в эфире не так уж много научно-популярных программ.

Есть школа. Не знаю, как у вас, а у нас в Германии школы все меньше учебного времени уделяют истории, культуре или искусству. Зато все больше — физике и математике.

Если мы хотим, чтобы у людей были знания о культуре и истории, роль музеев должна вырасти до невероятных масштабов. Музей должен быть посредником между наукой и обществом. И мы должны работать именно в этом направлении. Тут мало просто красиво расставить в витринах посуду, оружие, какую-то утварь и на этом успокоиться. Нужно сделать увлекательную историю, сюжет, рассказать так, чтобы было понятно и интересно. Конечно, я рискую преувеличить наши достижения в этом деле, но все-таки скажу. Есть любопытная статистика по Германии. Согласно ее результатам,

в музеи сейчас идет больше людей, чем, например, на футбольные матчи. Только в Берлине — почти 4 млн человек ежегодно. По всей Германии, возможно, более 30 млн человек посещают музеи.

— Фонд прусского культурного наследия настроен работать в тесной связке с нашими музеями. В частности, по довольно деликатной проблеме перемещенных культурных ценностей. Не могли бы вы прояснить позицию научного сообщества по этому вопросу?

— Да, проблема трофейного искусства и перемещенных ценностей иногда получает политическую окраску. Но мне сейчас хотелось бы сказать о другом. Мы, историки и археологи, не занимаемся политикой. Мы специалисты, ученые, мы хотим работать. И работать мы можем только вместе.

Например, было древнее погребение. Когда-то, предположим, еще в XIX столетии, его раскопали. Неважно кто — русские или немецкие археологи. И в нем было найдено, скажем, 30 ценных артефактов. А сейчас в результате войн и перемещений трофеев мы имеем такую ситуацию: 15 из этих артефактов в Эрмитаже, пять — в ГМИИ им. А.С. Пушкина, остальные десять — в Берлине. Но для археолога важно представить весь комплекс целиком и работать с ним. Потому что если не целиком, то это похоже на книгу с вырванными страницами. Как тут быть?

В 2013 г. мы делали совместную выставку «Бронзовый век. Европа без границ». Первая выставка проходила в Эрмитаже. Мы с М.Б. Пиотровским проводили первую экскурсию по этой выставке, потому что в числе зрителей были Ангела Меркель и В.В. Путин. И они оба, не сговариваясь, сказали, что на примере археологов им стало понятно, как можно и нужно работать вместе продуктивно. Там был забавный момент. Один из характерных экспонатов — бронзовая сковорода. Фокус в том, что основная ее часть, на которой когда-то готовили, хранится в Москве, рукоять — в Петербурге, а навершие рукояти — в Берлине. Но с этим сейчас нет проблем, пусть остаются где есть, главное, что ученые имеют ко всем фрагментам свободный доступ, невзирая на границы. Не так важно, где лежит находка. Важно, что заинтересованные люди могут с ней работать.

Сейчас, например, совместно с российскими музеями мы запускаем похожий проект: «Железный век. Европа без границ» — уверен, не менее интересный, зрелищный и поучительный.

Я думаю, это очень хороший пример для политиков и общества в целом. И это, кстати, кое-что говорит о роли музеев и подобных выставочных проектов в современном обществе и современной картине мира. ■

Беседовал Константин Кудряшов



В НАУКУ — СО ШКОЛЬНОЙ СКАМЬИ



Восточная мудрость гласит: хочешь иметь хорошего преемника — стань хорошим наставником. Этой истины придерживается руководство НИЦ «Курчатовский институт», уделяющее образовательным программам огромное внимание. Будущую смену здесь начинают воспитывать со школьной скамьи и даже с детского сада. О том, что представляют собой образовательные программы флагмана отечественной науки и какие они приносят результаты, — наш разговор с **Андреем Владимировичем Николаенко**, заместителем директора института по образовательной деятельности и молодежной политике, и **Павлом Анатольевичем Форшем**, главным научным секретарем Курчатовского института и директором Института нано-, био-, информационных, когнитивных и социогуманитарных наук и технологий в Московском физико-техническом институте — ИФТИ.



Кандидат экономических наук А.В. Николаенко

— Андрей Владимирович, вы как заместитель директора Курчатовского института курируете деятельность, связанную с молодежью, школьниками. Расскажите, в чем смысл этой работы, какую цель она преследует.

— Начну с того, что коллектив Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» сегодня — это более 12 тыс. сотрудников, занимающихся исследованиями по приоритетным направлениям науки и технологий. И более трети из них — молодые ученые и специалисты. В 2019 г. Курчатовский институт стал головной научной организацией в двух важнейших федеральных научно-технических программах — развитие генетических технологий и синхротронно-нейтронных исследований. Это серьезный вызов, требующий координации усилий образовательных и научных организаций, а также Минобрнауки России, региональных властей в подготовке нового поколения молодых ученых и специалистов.

Курчатовский институт сегодня эффективно сотрудничает более чем с 25 базовыми и партнерскими кафедрами и факультетами. Стоит особенно выделить наш базовый Институт нано-, био-, информационных, когнитивных и социогуманитарных наук и технологий (ИНБИКСТ) МФТИ, который успешно работает на основной площадке Курчатовского института. В этом году минимальный проходной порог для поступления абитуриентов достиг рекордных 286 баллов, что говорит об исключительной востребованности нового формата междисциплинарного образования. Студенты ИНБИКСТ МФТИ уже с первого курса вовлечены в деятельность научных комплексов Курчатовского института и имеют возможность выбрать направление своего профессионального развития.

Важную роль мы отводим работе со школьниками, в течение многих лет реализуя образовательные проекты в Москве и других городах, где находятся институты, входящие в НИЦ «Курчатовский институт», и наши партнеры.

Как видите, образовательная деятельность Курчатовского института весьма многогранна. Добавлю, что подготовка кадров ведется и в нашей аспирантуре, ежегодно проводятся также молодежные научные школы, конференции, семинары с участием ведущих ученых.

— Многие знают о Курчатовском проекте, объединившем более 30 московских школ, олимпиаде «Курчатов» и детском технопарке Курчатовского института. Расскажите об этих проектах подробнее.

— Президент Курчатовского института М.В. Ковальчук давно уделяет большое внимание работе со школьниками. По его инициативе в 2011 г. совместно с московским правительством начал работать Курчатовский центр непрерывного конвергентного (междисциплинарного) образования — «Курчатовский проект». На сегодня проект охватывает 34 московские школы. Столичный Департамент образования и науки обеспечивает повышение квалификации педагогов и оснащение учебных заведений современным учебно-лабораторным оборудованием, а ученые нашего института становятся научными консультантами школьных научно-исследовательских проектов.

Ежегодно мы выступаем ключевым партнером городской конференции «Курчатовский проект — от знаний к практике, от практики к результату», цель которой — повышение научной активности столичного педагогического сообщества и обучающихся, раскрытие и поддержка их интеллектуального потенциала. Курчатовский институт вместе с Москвой — также соорганизатор столичного конкурса исследовательских и проектных работ и предпрофессиональной олимпиады школьников, отвечающий за научно-технологическое направление этих проектов. Кроме того, мы регулярно проводим экскурсии для старшеклассников из школ — участниц проекта в лаборатории Курчатовского института. Это очень важно, так как школьники имеют возможность познакомиться с уникальным оборудованием, пообщаться с молодыми учеными и увидеть, насколько интересна и перспективна их работа.

Олимпиада «Курчатов» по физике и математике проводится для школьников шестых-одинадцатых классов. Она входит в перечень Российского совета олимпиад школьников, что позволяет победителям и призерам выпускных классов получить льготы в виде 100 баллов за ЕГЭ по соответствующему предмету при поступлении в вузы. Олимпиада ежегодно расширяется. В этом году

заключительный очный этап прошел в 22 российских регионах, при этом больше всего победителей оказалось из Москвы, Московской области, Санкт-Петербурга, Чувашии, Татарстана, Башкортостана.

В августе 2018 г. при активной поддержке Правительства Москвы и столичного Департамента промышленной политики был открыт Детский технопарк при Курчатовском институте. Образовательные программы разработаны нашими учеными и проходят в оснащенных современным оборудованием лабораториях технопарка: естественно-научной, информационных технологий, нейрокогнитивных технологий, природоподобных и энергетических технологий. Детский технопарк проводит уроки, открытые мастер-классы и экспресс-практики для школьников в летний период.

Каждый из перечисленных проектов имеет свои особенности и нацелен на свою аудиторию,

но общая задача — повышение престижа научных профессий, помощь школьнику с правильным выбором.

— **Андрей Владимирович, расскажите про образовательные программы и тематические смены для школьников в «Артеке» и «Сириусе».**

— Наше сотрудничество с «Артеком» далеко не случайно. Знаменитая детская здравница ежегодно принимает сотни тысяч детей из всех регионов России, дальнего и ближнего зарубежья. Только в августе этого года, когда мы работали в «Артеке» со своими научными программами, в лагере было 3470 детей из 76 стран и 79 регионов России. Это уникальная площадка для формирования будущего научного кадрового резерва для нашей страны. По инициативе М.В. Ковальчука в 2018 г. мы запустили пилотный проект организации научной проектной деятельности с детьми «Артека». В Крыму у НИЦ «Курчатовский институт» есть филиал. В историческом пространстве дачи академика И.В. Курчатова созданы экспозиции «Жизнь для науки» и «История советского атомного проекта». Теперь эта выставка стала интерактивной — разработан специальный путеводитель, позволяющий оценить интерес детей к таким сложным, но чрезвычайно важным аспектам нашей истории. Только за зиму и весну этого года наш крымский филиал посетили 1,5 тыс. детей! Крым — особая страница и в истории Курчатовского института и биографии И.В. Курчатова. Здесь он прошел свои «университеты жизни» (учился в лучшей гимназии и Таврическом университете), а с самого начала войны работал вместе с А.П. Александровым в Севастополе над размагничиванием кораблей. В 2019 г. мы стали официальным тематическим партнером «Артека». На конкурсной основе



1. В студии Курчатовского института «Физика космоса: что видно в телескоп?» («Артек»)

2,3. Практические занятия в профильном отряде Курчатовского института в «Артеке»



Доктор физико-математических наук П.А. Форш

мы награждаем детей — победителей различных научных олимпиад поездкой в Крым, где в «Артеке» они участвуют в проводимой Курчатовским институтом программе «Учимся у природы, создаем будущее». Программа включает в себя множество тем. Для тех, кто еще не погружен в науку, но интересуется ею, мы проводим мастер-классы и студии дополнительного образования.

Не менее важный партнер для нас — образовательный центр «Сириус». В этом году мы традиционно выступили одними из организаторов летней программы «Большие вызовы», где под руководством наших молодых ученых воспитанники «Сириуса» успешно реализовали проекты в области геномных исследований, применения полимерных технологий в медицине, робототехники и биоинженерии.

— Если можно, несколько слов о «кикоинском классе» в Пскове. Зачем он создан? Какие задачи там решаются и есть ли уже результаты?

— Курчатовский институт уже на протяжении многих лет проводит Кикоинские чтения, названные именем известного физика и просветителя, одного из ключевых участников советского атомного проекта академика И.К. Кикоина. В этом году по решению М.В. Ковальчука Кикоинские чтения впервые было решено провести в Пскове, ведь И.К. Кикоин жил здесь и был выпускником псковской гимназии № 1.

По договоренности с губернатором области М.Ю. Ведерниковым и руководством Псковского государственного университета в сентябре 2019 г. будет открыт «кикоинский класс» в школе, которую окончит будущий академик. Курчатовский институт окажет методическую поддержку и помощь с приобретением оборудования.

— Есть ли у вас дальнейшие планы, связанные с осуществлением образовательной деятельности?

— Безусловно, планы есть, и их много. Курчатовский институт динамично развивается, появляются новые направления, поэтому нам нужны молодые, хорошо образованные, широко мыслящие специалисты. Все это требует соответствующего прогнозирования, перенастройки образовательных программ, широкого внедрения новых технологий, большей кооперации с вузами. В ближайших планах распространение опыта нашей работы с московской системой образования в российские регионы. Такими пилотными проектами могли бы стать Ленинградская и Псковская области.

— Павел Анатольевич, расскажите о той части образовательных проектов Курчатовского института, которыми вы занимаетесь. Что они собой представляют, какая у них предыстория?

— ИНБИКСТ МФТИ — пример того, как меняется образование и какую важную роль в изменении парадигмы образования играет Курчатовский институт. Сегодня большинство открытий, технологических прорывов делаются именно на стыке наук, когда объединяются математики, физики, химики, биологи, медики, информатики и т.д. Именно здесь происходят наиболее интересные вещи в науке.

Для того чтобы эффективно работать в этом направлении, безусловно, нужно менять подготовку кадров, иначе говоря, готовить междисциплинарных специалистов, которые способны отвечать на стоящие перед наукой и обществом большие вызовы.

Такая междисциплинарная подготовка и осуществляется в ИНБИКСТ МФТИ. Идеолог такой системы — президент Курчатовского института и научный руководитель ИНБИКСТ МФТИ М.В. Ковальчук.

— Как осуществляется эта подготовка?

— Она непростая, поскольку помимо знания физики, математики, информатики — классики для выпускников МФТИ — ребятам нужно изучать и смежные науки: разбираться в биологических и медицинских направлениях, владеть основами химии, иметь представление о когнитивных науках. Поэтому от них требуется значительно больше усилий.

Если говорить о самой междисциплинарной подготовке, то за ее основу взяты как раз физики, потому что именно они владеют и математикой, и численными методами. Когда в исследовательский процесс внедряются физика, математика, информатика, то он из чисто описательного становится по-настоящему познавательным. Можно посмотреть физическими методами структуру, затем обработать, посчитать численными методами,

разработать математические теории. И мы действительно начинаем узнавать природу вещей.

— **Сбывается мечта философов всех времен и народов?**

— Да, это так. Сейчас акцент смещен на биообъекты, объекты живой природы, в то время как еще в прошлом веке объектом исследования были в основном неорганические материалы, полупроводники. Поэтому мы сейчас приближаемся к целостному восприятию окружающего мира, делаем ставку на природоподобные технологии. Но для того чтобы эффективно работать в этой области, выпускникам вузов нужно знать многое об объекте исследования. Именно поэтому в программу подготовки студентов в ИНБИКСТ МФТИ добавлен целый ряд новых для них дисциплин.

У нас налажена очень хорошая связка между МФТИ и Курчатовским институтом, потому что МФТИ — это ведущий вуз в области физики, математики, информатики. Мы используем весь их богатейший опыт, знания, умения в преподавании общих дисциплин. Мы присовокупляем сюда также мощную технологическую базу Курчатовского института, чтобы иметь возможность работать над крупными междисциплинарными проектами, которые стоят перед нашей страной.

— **Какие конкретно проекты имеются в виду?**

— Например, сейчас Курчатовский институт выполняет функции головной научной организации по двум программам: развитие генетических технологий; синхротронные и нейтронные исследования. Кроме того, различные направления в области нано- и биотехнологий, природоподобных технологий тоже, безусловно, представляют собой приоритетные направления, в которых ребята себя реализуют и во время учебы, и в дальнейшем. Уже с первого курса студенты зачисляются

в лаборатории Курчатовского института, становятся полноценными сотрудниками и участниками научных исследований.

— **И какие у них успехи?**

— Очень многие студенты к окончанию магистратуры имеют немалый опыт проведения собственных научно-исследовательских работ, выступлений на российских и международных конференциях, становятся соавторами научных статей и патентов, успевают поучаствовать в программах по грантам как внутренним Курчатовского института, так и внешним. В результате они выходят весьма подготовленными и квалифицированными специалистами.

— **Означает ли это, что они остаются работать в Курчатовском институте?**

— Многие остаются работать здесь, больше трети идут в аспирантуру Курчатовского института,



1. Проект «Модель электрической рыбы», реализованный при кураторстве ученых Курчатовского института

2. Ученый Курчатовского института В.И. Гомзяк (справа) на занятии со школьниками в «Сириусе»

3. Работа над научным проектом в «Сириусе»



Участники XXXIII Кикоинских чтений (Псков)

где, по сути дела, они продолжают развивать те научные направления, в которых уже участвовали. Надо сказать, у Курчатовского института есть не только эта центральная площадка в Москве, но и еще подведомственные организации в Санкт-Петербурге, Гатчине, Протвине. Кто-то из ребят идет работать туда. В принципе, все весьма востребованы. Если проследить траекторию их карьеры, то очень многие становятся за достаточно короткий срок лидерами, руководителями научных групп. Основа, фундамент, знания, которые у них есть, позволяют им достаточно легко ориентироваться в разных областях науки и техники и, соответственно, тянуть за собой коллектив. Более того, когда человек знает не только физику, математику или информатику, но еще много чего из смежных дисциплин, он становится интересным собеседником в любой компании. Он никогда не пропадет, не затеряется, потому что ему на любую тему, как правило, есть что сказать.

— **Да и женщины влюбляются в таких образованных и умных.**

— Девушки влюбляются в наших выпускников, а мужчины без ума от наших выпускниц.

— **А у вас много девушек?**

— Как ни странно, в нынешнем наборе их почти половина, что вообще-то несвойственно Физтеху. Девочки, как правило, более усидчивы и учатся в целом лучше мальчиков. И то, что девочек привлекает наше направление, говорит, по-видимому, о том, что у него большие перспективы.

— **ИНБИКСТ МФТИ существует десять лет. Значит, уже можно подводить предварительные итоги. Попробуем?**

— Давайте. У нас уже есть выпускники факультета, которые отучились в аспирантуре Курчатовского института, защитились и активно работают в самом институте. Приятно, что они уже берут студентов под свое научное руководство, ведь они как никто другой знают все особенности и тонкости обучения.

У нас есть выпускник, ставший директором школы. Есть те, кто зачислен преподавателями в ИНБИКСТ МФТИ и непосредственно ведут занятия со студентами.

Научная деятельность одной из наших выпускниц, которая поступила в аспирантуру Курчатовского института и уже окончила ее, связана с крайне интересным и важным направлением — применением естественно-научных методов для изучения предметов культурного наследия. В 2018 г. она за свою работу в составе коллектива авторов была удостоена

премии им. И.В. Курчатова — одной из самых престижных премий НИЦ «Курчатовский институт». Таких примеров можно приводить множество.

— **Некоторые считают, что человек, занимающийся междисциплинарными исследованиями, глубоко не знает ни одной дисциплины.**

— Это, безусловно, заблуждение, потому что наши выпускники — прежде всего физики и математики, а также хорошо знают информатику. Они прекрасно владеют этими дисциплинами. Но кроме этого они владеют дополнительными знаниями из других, смежных областей. Я бы сказал, что их знания и кругозор шире, чем у обычных выпускников физических и математических факультетов. У них багаж побольше. Но и учиться им сложнее, поскольку за тот же срок нужно усвоить значительно больший объем материала.

— **Эта программа осуществляется исключительно с Физтехом или есть какие-то еще вузы, с которыми сотрудничает Курчатовский институт?**

— Сейчас в большинстве учебных заведений начинают ориентироваться на междисциплинарные направления. Наука стремится к междисциплинарности. Поэтому повсеместно появляются такие направления подготовки, как биотехнологии, биофизика, медицинская физика, ядерная медицина и пр. Целый ряд вузов делает это вместе с нами. У нас есть базовые кафедры в МГУ, СПбГУ, МИФИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана и во многих других крупных вузах России. Этот процесс перехода к междисциплинарной подготовке кадров неизбежен, само время его диктует, поэтому многие вузы встают на эту тропу. Само направление конвергенции наук и технологий еще десять лет назад начал развиваться в Курчатовском институте М.В. Ковальчук, и мы его успешно перенесли в систему подготовки кадров. ■

Беседовала Наталья Лескова

12+

Реклама



СНИМАЙ НАУКУ!

Участвуй
в видеоконкурсе!

Выигрывай
ценные призы

Подробности на
NAUKATV.RU

ЭКСПЕРИМЕНТ «СИНИЙ ОГОНЬ»

СИНЕЕ ПЛАМЯ ГОРЯЩЕГО ВОДОРОДА,
ОКРАШЕННОЕ ИОНАМИ МЕДИ



ПОЗНАНИЕ



МОЯ ПЛАНЕТА
ТЕЛЕКАНАЛ



НАУКА
ТЕЛЕКАНАЛ



ЖИВАЯ ПЛАНЕТА
ТЕЛЕКАНАЛ



ПЛАНЕТА HD
ТЕЛЕКАНАЛ



ИСТОРИЯ
ТЕЛЕКАНАЛ



ДОКТОР
ТЕЛЕКАНАЛ



ТЕЛЕКАНАЛ



**ПОВЕРИТЬ
АЛГЕБРОЙ
ГАРМОНИЮ*
ЗДОРОВЬЯ**

* «Поверил я алгеброй гармонию»
(А.С. Пушкин, «Моцарт и Сальери»)

Любая болезнь излечима, уверен создатель цифровой диагностической системы «Виктория» доктор экономических наук Виктор Николаевич Литуев. Только для победы над недугом надо бороться не с его последствиями, а с причинами.

На экране компьютера достаточно стандартная картинка: таблица, рядом — хитрая диаграмма из множества связанных между собой кружков разного цвета. Точнее, цветов всего три: красный, зеленый и синий. Сейчас такие картинки принято называть инфографикой и вставлять во всяческие презентации, где они помогают наглядно и просто рассказать об абстрактных и сложных вещах. Автор программы словно читает мои мысли:

— Думаете, простой график? И да, и нет. С одной стороны, действительно, все просто: есть некоторое число базовых параметров и есть связи между ними. А с другой стороны — перед вами здоровье конкретного человека: пациента с раком предстательной железы в стадии длительной ремиссии. Красным цветом отмечены параметры в патологическом состоянии, синим — те, что находятся в промежуточном положении и могут легко свалиться либо в патологию, либо в норму, как толкнуть. Наконец, зеленый — желанный цвет нормы, показатель здоровья индивидуального пациента.

— А параметры — результаты всевозможных анализов?

— Не только. Если говорить именно про этого человека, тут учтено 67 параметров: от возраста и описания патологии (рак предстательной железы, операция по удалению была проведена в 2011 г.) до результатов общего анализа крови и биохимических показателей. Параметры эти всегда так или иначе взаимосвязаны.

— Одни вытекают из других?

— Правильнее сказать, что одни влияют на другие. В конечном счете все параметры можно связать в одну сеть. Все в той или иной степени влияет на все.

— Как говорят экономисты, даже взмах крыла бабочки в Кейптауне влияет на курс акций на Нью-Йоркской бирже?

— Примерно так. Но есть воздействия слабые и опосредованные, которыми можно пренебречь, а есть сильные и прямые, которые необходимо учитывать. Программа их ищет и выстраивает в графах. Возвращаясь к рассматриваемому случаю: все 67 параметров объединились

в 16 взаимосвязанных структур. Для практики индивидуальной терапии важное значение имеет вычисление агрегатных состояний, когда два параметра представляют собой единое целое. Ни один из них в этом случае не выполняет своих функций, и агрегатное состояние становится неким образованием, которое по сути может быть и онкологическим. У данного пациента в патологической красной зоне в агрегатном состоянии находятся липопротеины низкой плотности (ЛПНП)...

— ...в народе более известные как «плохой холестерин».

— Совершенно верно. И в паре с ним параметр «онкопредст 1», характеризующий латентное состояние онкологии предстательной железы. Параметр ЛПНП здесь в два раза превышает средний размер по данным референсных значений, соответственно, можно сделать вывод, что именно это — причина существования параметра «онкопредст 1». Другой пример, уже в синей зоне: агрегатное состояние параметров «лактатдегидрогеназа» (ЛДГ), особого фермента, без которого невозможны процессы окисления глюкозы и выработка молочной кислоты, и «протромбин по Квику» (в медицине этот показатель используется для оценки времени свертываемости крови, а также для исследования работоспособности кишечника, желудка и печени). В смысле терапевтических назначений это агрегатное состояние имеет нейтральный характер. Третий пример агрегатного состояния уже в зеленой зоне в рассматриваемом случае — тромбоциты и мочевины. Тут понятно, что мочевина как биохимический продукт образуется у данного конкретного пациента из тромбоцитов. Еще одна зеленая «агрегатная пара» — альфа-1- и альфа-2-глобулины. Альфа-1-глобулинов здесь меньше, а альфа-2-глобулинов больше среднего значения. Поскольку и тот и другой типы глобулина участвуют в ингибировании процессов развития инфекции и воспалений, их агрегатное действие в зеленой зоне увеличивает иммунный потенциал организма. В целом, как показывает опыт обработки массивов данных индивидуальных пациентов, взаимосвязи в зеленой зоне — это «сотрудничающие» параметры, которые



Доктор экономических наук В.Н. Литуев

в конечном счете определяют потенциал здоровья конкретного пациента. На их основе рассчитывается «индекс здоровья». В данном случае он достаточно высок: 70,15%.

— **То есть пациент на 70% здоров и на 30% болен?**

— Центр всех взаимосвязанных структур — красный параметр «глюкоза», у которого максимальное количество взаимосвязей с другими параметрами. Кроме того, он напрямую и опосредованно через другие параметры связан практически со всеми другими параметрами, образовавшими периферийные структуры.

— **Глюкоза здесь — «универсальный убийца»?**

— Получается, что так. Теперь мы можем вывести зависимость этого показателя от других. Получается, что параметр «глюкоза» находится в прямой зависимости (примерно на 27%) от уровня гликированного гемоглобина (*HbA1c*) и (на 22%) от эритроцитарного индекса (*МСНС*) и в обратной зависимости от коэффициента атерогенности (22%) и от патологии «онкопредст 2». Последний выражает «предпатологическое» состояние предстательной железы, когда возможно эффективное медикаментозное лечение. То есть глюкоза будет расти, если будут расти гликированный гемоглобин и эритроцитарный индекс, при этом будет падать коэффициент атерогенности. Напротив, глюкоза будет падать, если будет падать *HbA1c* и *МСНС*, но будет расти коэффициент атерогенности. Все эти параметры мы умеем регулировать. Соответственно, имея все эти данные, мы можем не просто поставить конкретному пациенту общий диагноз, но расписать ему все сопутствующие патологии, определить их причины и пути развития — то есть составить именно конкретную «историю болезни», а не ее обобщенный образ, как это делалось до сих пор. И бороться не столько с самой болезнью, сколько с причинами, ее вызывающими и подталкивающими к ней.

700 ФОРМУЛ ЗА ДЕСЯТЬ ЧАСОВ

— Виктор Николаевич, вообще идея создания программного диагностического комплекса витает в воздухе. Давно пора, как сказал Сальери в «Маленьких трагедиях» Пушкина, поверить алгеброй гармонию, только уже не музыки — там теоретики давно все по математике разложили, — а здоровья. Но пока создать реально работающий продукт никому не удалось.

— Возможно, у моих коллег-конкурентов мотивация была слабее. Когда я создавал свой метод и построенную на нем программу, основным желанием было не разбогатеть и не прославиться. Желание помочь человечеству было, но и оно не было главным. Я боролся за свою жизнь. У меня работал инстинкт самосохранения, как известно, самый сильный у живых существ.

— **Вам что-то угрожало?**

— Мне угрожал один из страшнейших врагов человека. В 2009 г. мне поставили диагноз: рак кишечника в четвертой стадии. В Германии меня оперировал выдающийся хирург «всех времен и народов» Марк Шрадер, руководитель Проста-центра клиники Хелиос Берлин-Бух в Берлине, один из кураторов проекта по совершенствованию роботов-хирургов *da Vinci*. Мы теперь друзья. Операция прошла успешно, но спустя три месяца у меня случился рецидив — стал расти онкоген. Взрывной рост, в 10 тыс. раз за месяц. Рост онкогена — это цифры, математика, наука точная, с ней не поспоришь. Прогноз был очень неблагоприятный, от трех месяцев до года. В Германии доктор Шрадер предложил мне лучевую терапию. На размышление были те же три месяца.

— **А о чем здесь размышлять? Лучевая терапия при всех минусах, при всей жесткости метода — это шанс. Пусть небольшой, но отличный от нуля.**

— Но это еще и мутация клеток и медленное сползание к состоянию овоща. Я чувствовал, что должен быть еще какой-то выход. Если есть шанс при таком варианте, должен быть еще вариант со своим шансом. Как-то я проснулся в час ночи...

— **Хорошие идеи часто приходят ночью. Наверное, сказывается отсутствие отвлекающих факторов.**

— Знаете, в сравнении с ожиданием смерти какие-то отвлекающие факторы вообще теряют актуальность. Так вот, я проснулся в час ночи, долго ворочался, не мог уснуть. Да и не хотел, честно говоря, засыпать. Я вдруг явно почувствовал, что в голове носится какая-то важная мысль, идея, которую надо ухватить. Так что было не до сна.

— **С идеями надо быть осторожным.**

— Я это прекрасно знаю, я ведь доктор наук, всю жизнь занимался проблемами прикладной математики, теорией вероятности и динамическими

рядами. Окончил исторический факультет МГУ по кафедре источниковедения и методов анализа, после чего поступил в аспирантуру и параллельно, в 1980 г., на факультет вычислительной математики и кибернетики МГУ, где учился у основателя факультета академика А.Н. Тихонова.

Так вот, той ночью я поднялся, сел за стол и где-то до 11 часов написал порядка 700 строк уравнений.

— Уравнение — это всегда связь каких-то параметров. Что вы в них заложили, свое здоровье?

— В общих чертах они отражали различные параметры состояния человеческого организма, в том числе внутриклеточных процессов. Грубо говоря, в своих уравнениях я попытался описать себя двоичными кодами.

— Получилось?

— Получилось нечто чудесное. Я взял за основу уравнение нелинейной регрессии... По моему мнению, это лучшее, до чего дошло человечество в математике. В результате получил цифровую модель своей патологии.

— На основе чего? Откуда параметры?

— На основе универсального показателя — анализа крови. Анализ крови — это на самом деле клеточный анализ. Тромбоциты, лейкоциты, эритроциты — это все клетки. Тромбоцит — это безъядерная клетка, эритроцит — клетка с ядром и т.д. У меня получился простейший метод диагностики — математически-клеточный.

— Думаю, не такой уж и простейший, раз им до сих пор еще никто не воспользовался.

— Верно, потому что у нас до сих пор медицина — в наименьшей степени наука точная и в наибольшей эмпирическая.

— Я бы сказал — прецедентная. Как прецедентное право. То есть врач, наблюдая определенные симптомы, ищет подобные случаи в прошлом и лечит по прецеденту: тогда помогло то-то, значит, и сейчас попробуем то же.

— Это, конечно, очень грубо, и вы рискуете настроиться против себя врачебное сообщество, но в целом, действительно, объяснить практикующим врачам, как можно использовать в диагностике математический и статистический анализ, очень сложно. Я пять лет пытался. Не знаю, как объяснить, почему плюс на минус будет минус. Есть некий предел объяснений.

— Но ведь математический аппарат в конечном итоге всегда составляет базис любой естественной науки.

— Меня мой отец-математик учил, что математика — это фантазирование по правилам. И я просто ничего по-другому не воспринимаю. Вот так, фантазируя по математическим правилам, я вывел уравнение, точнее, систему уравнений, с помощью которой можно проследить путь развития заболевания.

— Иначе говоря, его математическую модель.

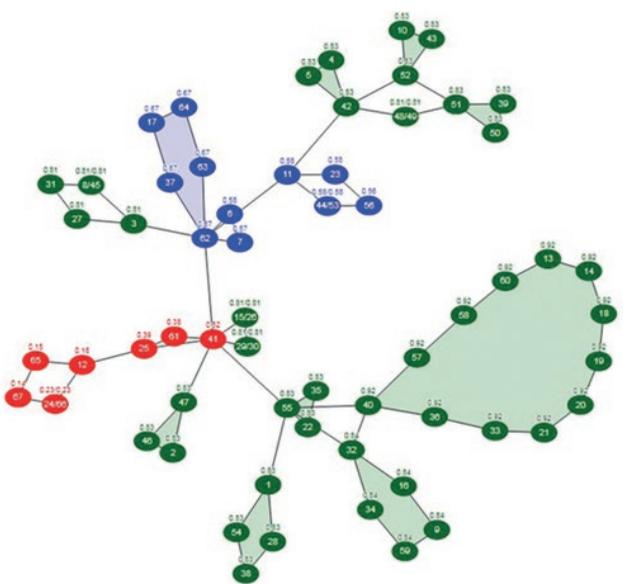
— Именно. Подставив в него свои значения, я понял, от чего зависела моя патология, нашел ее причину. Она оказалась очень далека от того, что говорили врачи. 90% моих параметров в модели вели к росту онкогена, но там рост был спокойный, а тут — взрывной. Откуда? И я нашел один главный лидер-параметр, дававший 30% общего эффекта.

— 30% — очень много.

— Конечно, и 10% много, что уж про 30% говорить. Так вот, моя модель показала, что главным драйвером роста опухоли стал избыток печеночного фермента по имени гамма-глутаминтрансфераза (ГГТ).

— Знаю, он повышается при циррозе печени, при гепатите, при раке предстательной железы...

— А вы не предполагаете, что тут может быть обратная зависимость: не уровень ГГТ повышается вследствие онкологического заболевания, а, напротив, онкологическое заболевание возникает и прогрессирует потому, что уровень ГГТ повышен? Этот фермент формально не опасен, но по сути — ужасен, поскольку подталкивает развитие онкологии, выступает ее драйвером. Так вот, проблема с развитием опухоли для меня сместилась в сторону проблемы с переизбытком ГГТ. С этой проблемой я и пришел к своему лечащему врачу О.В. Гайсенку, который потом стал моим соавтором в разработке комплекса «Виктория». Оказалось, что она легко решается приемом одного препарата — «Урсофалка». Я начал его



У конкретного пациента с раком предстательной железы 67 параметров, как показывает рассчитанный программой граф, объединились в 16 взаимосвязанных структур. Красная зона — область патологии, синяя — риска, зеленая — здоровья (нормы). Узловой патологический параметр (41) — уровень глюкозы в крови.

принимать, а когда в назначенный срок прилетел в Германию к доктору Шрадеру, анализы показали полное отсутствие у меня какой-либо онкологии.

— **Это чудо?**

— Это было бы чудом, если бы был непонятен механизм оздоровления. Тут же все получалось более или менее ясно. В то время как традиционная медицина чаще всего борется с последствиями повреждения организма, я нашел его причину, ликвидировал и в результате получил то, что получил. С тех пор прошло уже десять лет, а я живой и пока это свое состояние на противоположное менять не планирую. Развив тот мой метод, мы с доктором О.В. Гайсенком, кандидатом медицинских наук, разработали способ диагностики неинфекционных заболеваний на основе статистических методов обработки данных, который защитили российским патентом № 2632509. А уже на основе этого патента создали «Цифровую платформу диагностики патологий "Виктория"».

ЦИФРОВАЯ МЕДИЦИНА И АНАЛОГОВАЯ

— **Я так понимаю, что название «Виктория» — игра слов, победа над болезнью с намеком на ваше имя?**

— Победа над болезнью — да, а вот с моим именем — не совсем. От меня здесь — именно буква «Я», завершающая название. А начало — это моя жена, которую зовут Виктория. Она как никто другой поддерживала меня, когда я создавал систему, отсюда и название. За несколько лет я пропустил через программу данные более 1 тыс. человек. Рекомендации выдаю только после совещания с врачами. Ко мне обращаются пока в основном на финальных стадиях болезни, когда уже чувствуется, что официальная медицина не очень хорошо помогает. Именно тогда человек включает собственный мозг и начинает искать параллельные пути, которые могут вывести на правильную дорогу. Рекомендации помогли всем без исключения пациентам. Конечно, я главный терапевт своей семьи. Тут все равны, но приоритет у внуков. Среди любимых и постоянных пациентов — академик и священники. Теперь чувствуют себя прекрасно, при том что у всех возраст около 80 лет.

— **И сколько времени требуется на обработку одного пациента?**

— Когда я только начинал работу с комплексом, на человека уходило около семи часов. Сейчас процесс отлажен, на обработку данных, аналитику и рекомендации уходит 15–30 минут. В сложных случаях. В простых — меньше.

— **И все-таки вы же не медик, чтобы заниматься столь серьезными медицинскими проблемами.**

— Знаете, за это десятилетие я стал в этой области очень, осторожно скажем, продвинутым...

— **Пациентом?**

— Ну, пусть будет так. Беда в том, что современная медицина принимает отдельного пациента как некий кейс. Как статистический случай.

— **Это ошибка?**

— Это даже не ошибка, это трагедия. Если мы возьмем десять пациентов, двести, десять тысяч, сто тысяч, миллион, мы все равно будем говорить о некоем среднем показателе, так устроен метод математической статистики. А это для вашего и моего организма неправильно. Мы же не виртуальные средние величины.

— **Разумеется, не хочу быть просто средней величиной. Как в случае со средней температурой по больнице, когда у двух третей пациентов температура 24 градуса, у трети — 42 градуса, а в среднем — 36,6.**

— И наши конкретные показатели будут всегда так или иначе, в большей или в меньшей степени отличаться от среднестатистических. Взять даже простую, казалось бы, хворь — цистит (воспаление мочеиспускательного канала). Когда я погрузился в проблему, насчитал у этой патологии 18 различных путей формирования. То есть у каждого такого больного свой, личный цистит. А всех пытаются лечить одной и той же таблеткой. Это трагедия! Этого нельзя делать.

— **Вы предлагаете каждому делать персональную таблетку?**

— Необязательно, но комплекс принимаемых медикаментов, сам план лечения для каждого человека должен быть строго индивидуальным, подходящим именно к его ситуации. Болезнь у разных пациентов может быть формально одна, но лечиться она должна по-разному, в зависимости от путей ее возникновения и развития. Очень грубо: у нас может быть сотня очень похожих внешне замков, но открывать их следует каждый своим ключом. Мы же до сих пор пытаемся открыть универсальной отмычкой, которая часто эти замки просто ломает.

— **С этим несложно согласиться, прочитав у любого медикамента список возможных побочных эффектов. Более того, я иногда в этих списках в качестве побочного эффекта встречал «возможную парадоксальную реакцию». То есть, скажем, лекарство от стенокардии у некоторых людей и при некоторых условиях может эту стенокардию усилить, а болеутоляющее средство может обычную головную боль превратить в нестерпимую.**

— Я проанализировал, как уже говорил, данные тысячи человек и не нашел ни одной пары одинаковых графов взаимосвязи между клетками. Ни одной! Мы все разные, каждый из нас индивидуален. Однажды мне попались анализы большой группы ВИЧ-инфицированных, так у них я по системам взаимосвязей не нашел одинаковых патологий. Их просто нет!

— **Все болезни не менее индивидуальны, чем их носители?**

— А то и более. Марк Шрадер как-то задал мне задачку: среди 500 анализов разных людей выявить с помощью моего метода урологических онкобольных. Я нашел 84 человека, имеющих высокую вероятность онкозаболеваний этой сферы. И у каждого своя причина. А это автоматически означает, что и методы лечения тоже должны быть индивидуальными. Если, конечно, мы хотим не временно подавить, а именно победить болезнь.

— **Но у нас сейчас лечение достаточно индивидуально. Прежде чем поставить диагноз и прописать препараты, врач в любом случае лично осматривает пациента, изучает его историю болезни, назначает анализы...**

— Конечно, потому что прописать человеку таблетку, по крайней мере не выяснив, нет ли у него на данный препарат аллергии, крайне неразумно. А анализы помогают при схожих симптомах наиболее точно определить, какой именно недуг из огромного списка болезней эти симптомы вызывает. На практике же часто бывает так: попадет к врачам человек с сердечным приступом, у него берут анализ крови, обнаруживают сахарный диабет. И, увы, начинают с лечения диабета, хотя он в данный момент не создает непосредственную угрозу для жизни.

— **В отличие от инфаркта. С другой стороны, пока этому больному лечат сердце, он вполне может впасть в диабетическую кому со всеми вытекающими последствиями.**

— Я всегда говорю: можно фантазировать по поводу состояния пациента, а надо просто измерить конкретные величины. Таков математический подход. Сегодня мы в состоянии математически измерить более 1,5 тыс. параметров у каждого конкретного пациента. Здесь не только анализ крови, который сам по себе дает огромный объем важной информации, это еще генетические, эпигенетические, транскриптомные, протеомные, метаболомные и метагеномные методы обследования пациента.

— **То есть мы фактически можем сделать такой слепок биохимического состояния организма?**

— Да, и теперь медикам необходимо научиться использовать этот массив данных наиболее эффективно.

— **С помощью вашей программы?**

— С помощью той сложной системы уравнений, которая заложена в программу. Вообще, идея поверить алгеброй гармонию здоровья — это то, чем сейчас действительно нужно заниматься. Помните, ведь и химия еще несколько столетий назад была наукой эмпирической. Алхимики просто наугад смешивали разные вещества, нагревали их, перегоняли, выпаривали, растворяли и т.д., и потом

просто смотрели, что получалось. Повезло — нашли что-то полезное, не повезло — годы работы пошли насмарку. Только после того как под химию положили четкий математический аппарат, она стала точной наукой, и теперь ученый-химик может с высокой степенью точности синтезировать необходимые вещества сначала на бумаге (сейчас — в компьютере), а уже потом — *in vitro* (в колбе). Раньше алхимик больше напоминал слепца, пытающегося в темноте соорудить дом из того, что попадет под руку. Счастье, когда ему удавалось создать что-то, что можно было с большой натяжкой использовать как конуру. А вооруженный математическими методами современный химик — это зрячий зодчий, строящий на прекрасно освещенной площадке с помощью современной строительной техники из специальных стройматериалов сооружения любой сложности, вплоть до огромных небоскребов. Примерно такой же революционный путь предстоит пройти и медицине, чтобы выйти на принципиально новый уровень.

— **То есть сейчас медики, как те алхимики, скармливают пациенту таблетку и смотрят, как она подействует. Плохо подействовала — даем другую, повезло — пациент выздоровел, не повезло — скончался. А математические методы, на которых построена ваша цифровая диагностическая система, дадут ему знание о том, как болезнь возникла, что заставляет ее развиваться и как помочь организму с ней справиться.**

— Конечно. Мою программу нельзя рассматривать как панацею, как часто можно увидеть рекламу всяких хитрых устройств для зарядки воды или для ультразвукового, инфракрасного, микроволнового воздействия, которые «лечат все». Нет, «ВикториЯ» — не более чем рабочий инструмент врача, который способен сделать его работу более эффективной, потому что поможет избежать ошибок в диагностике и составить для конкретной болезни и конкретного пациента конкретный план даже не столько лечения, сколько именно излечения. Только так мы наконец научимся лечить не болезнь, а человека.

Андрей Николаевич Богатырев, член-корреспондент РАН:

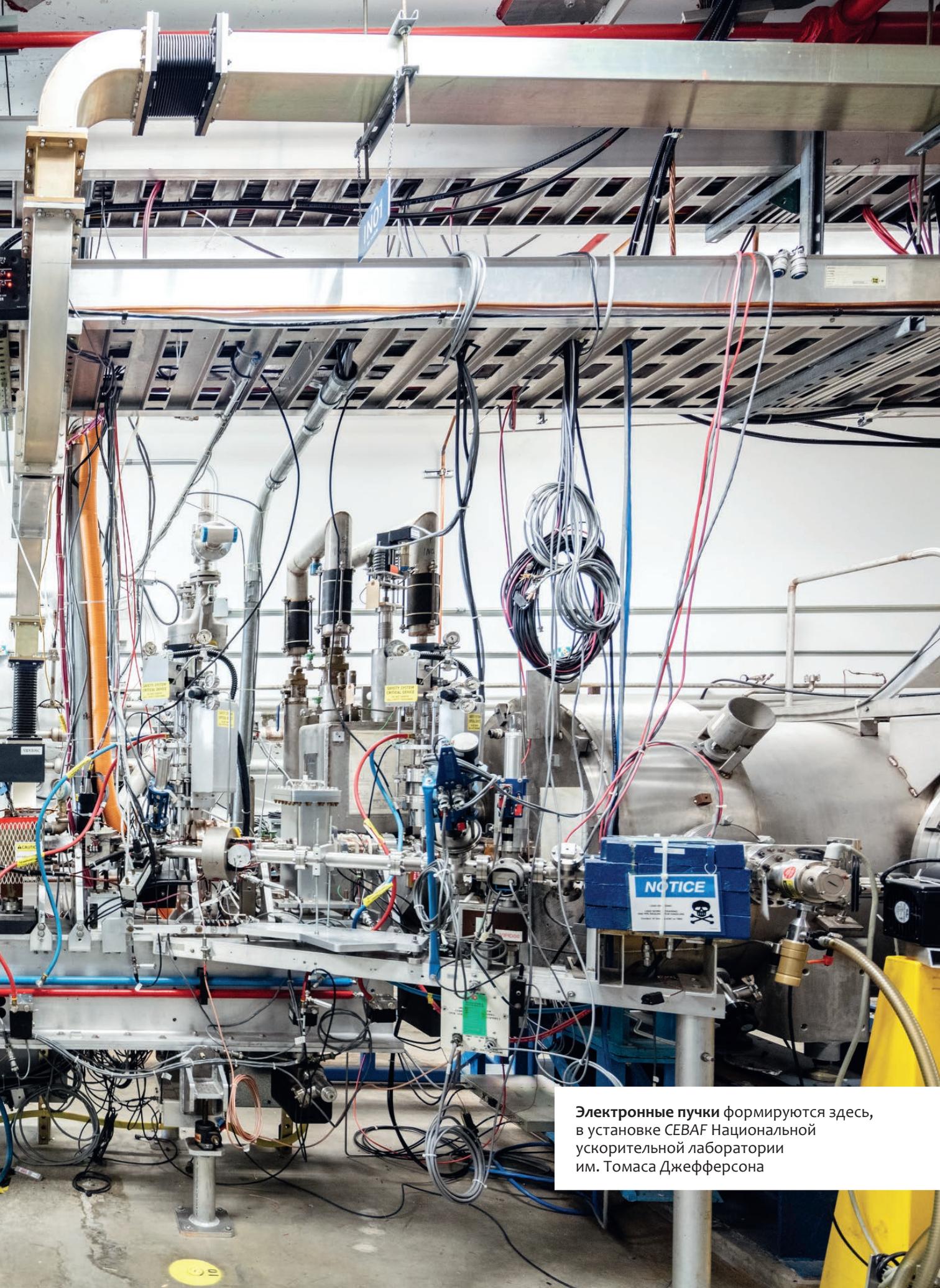
— С Виктором мы давно знакомы. Можно сказать, что он как создатель цифровой диагностической системы участвует в улучшении качества моей жизни, а в конечном итоге, надеюсь, увеличивает ее продолжительность. Мне сейчас 84 года, а я не только живу, но еще и тружусь. Рекомендации не только улучшили состояние моих печени и суставов, но и радикально подняли настроение и ощущение полноты жизни. Дай бог, чтобы эта система была внедрена в медицинскую практику. ■

Беседовал Валерий Чумаков

ГЛУБОЧАЙШИЕ ТАЙНИКИ АТОМА

Откуда протоны и нейтроны берут свои массу и спин? Удивительно, но мы не знаем. Новая установка обещает заглянуть внутрь этих частиц, чтобы найти ответы

Абхай Дешпанде и Рикутаро Есида



Электронные пучки формируются здесь, в установке SEBAF Национальной ускорительной лаборатории им. Томаса Джефферсона

ОБ АВТОРАХ

Абхай Дешпанде (Abhay Deshpande) — профессор физики Университета штата Нью-Йорк в Стони-Брук, основатель и директор Центра пограничной ядерной физики, цель которого — научное обоснование проекта и поддержка строительства Электрон-ионного коллайдера (ЭИК).



Рикутаро Есида (Rikutarō Yoshida) — главный научный сотрудник Национального ускорительного центра им. Томаса Джефферсона, директор Центра Электрон-ионного коллайдера, который помогает развивать и поддерживать научную программу будущей установки.



С

огласно оценкам, наблюдаемая Вселенная содержит примерно 10^{53} кг обычной материи, большей частью в виде около 10^{80} протонов и нейтронов, из которых, а также из электронов, состоят атомы. Но что дает протонам и нейтронам массу?

Ответ на этот вопрос, как оказалось, непрост. Протоны и нейтроны состоят из частиц, называемых кварками, и связывающих их вместе частиц, которые получили название «глюоны». Глюоны не имеют массы, и сумма масс кварков внутри протонов и нейтронов (вместе называемых нуклонами) составляет примерно 2% суммарной массы нуклона. Так откуда же берется остальная?

И это не единственная загадка основных компонентов атома. Аналогичным образом необъясним спин нуклонов — спин кварков внутри них не может дать этому объяснение. В настоящее время ученые полагают, что спин, масса и другие свойства нуклона возникают в результате сложного взаимодействия кварков и глюонов внутри него. Но как именно это происходит, остается загадкой. Теория может сказать ученым лишь это немного потому, что взаимодействия кварков и глюонов описываются

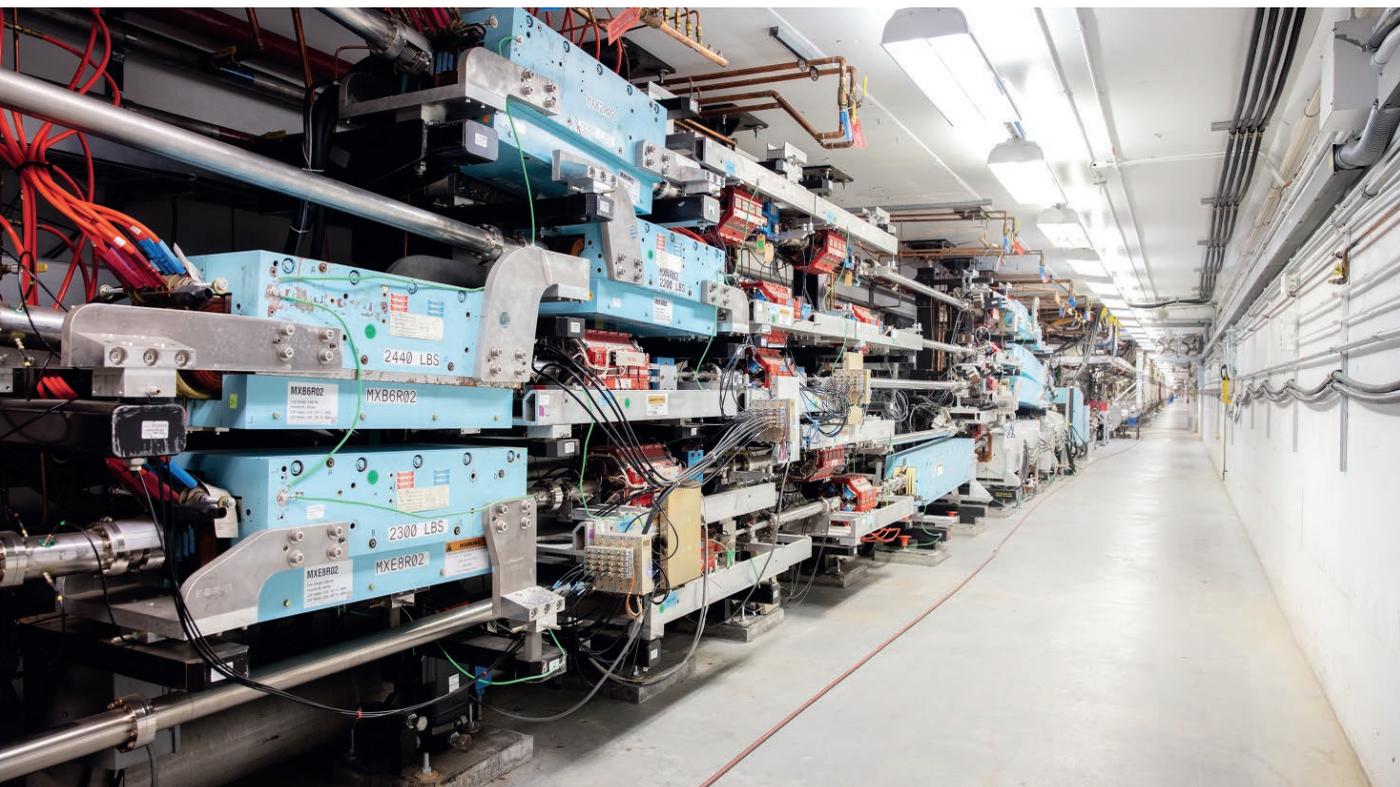
теорией под названием «квантовая хромодинамика» (КХД), проводить вычисления в которой невероятно трудно.

Чтобы продвинуться вперед, нам необходимы новые экспериментальные данные. И вот здесь на сцену выходит Электрон-ионный коллайдер (ЭИК). В отличие от других машин, таких как Большой адронный коллайдер *CERN* в окрестностях Женевы или Релятивистский коллайдер тяжелых ионов (*RHIC*) в США, в которых сталкиваются составные частицы, такие как протоны и ионы, внутри ЭИК с протонами и нейтронами будут сталкиваться электроны. У последних нет внутренней структуры, и поэтому они становятся чем-то вроде микроскопа, позволяющего заглянуть внутрь составных частиц.

Электрон-ионный коллайдер — один из главных приоритетов американского сообщества физиков-ядерщиков, и скорее всего он будет построен в одной из двух

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Откуда протоны и нейтроны берут свою массу и спин? Как ни удивительно, ученые этого не знают.
- Каким-то образом компоненты этих частиц — кварки и глюоны — объединяются в сложных взаимодействиях, которые формируют свойства протонов и нейтронов.
- Чтобы понять как, физики хотят построить Электрон-ионный коллайдер, который будет сталкивать протоны и атомные ядра с электронами, чтобы получить трехмерную картину внутренней структуры ядра.



Магнитные диполи, окрашенные в голубой цвет, помогают управлять пучками электронов, когда они разгоняются в петле CEBAF

физических лабораторий США — Брук-хейвенской национальной лаборатории на Лонг-Айленде или Национальной ускорительной лаборатории им. Томаса Джефферсона (Лаборатории Джефферсона) в городе Ньюпорт-Ньюс, штат Виргиния. Если одобрение будет получено, коллайдер начнет получать данные где-то около 2030 г. Ускоритель сможет разглядеть, каким образом спин и масса отдельных кварков и глюонов, равно как и энергия их коллективного движения, объединяются, чтобы создать спин и массу протонов и нейтронов. Он должен также ответить на другие вопросы, например: объединены ли кварки и глюоны в единое целое или же распределены внутри нуклонов; как быстро они двигаются; какую роль эти взаимодействия играют в связывании нуклонов в ядрах? Данные измерений на Электрон-ионном коллайдере станут сокровищницей новой информации о том, как базовые компоненты материи взаимодействуют друг с другом, чтобы образовать видимую Вселенную. Спустя 50 лет после открытия кварка мы наконец на пороге раскрытия его тайн.

Эмергентные явления

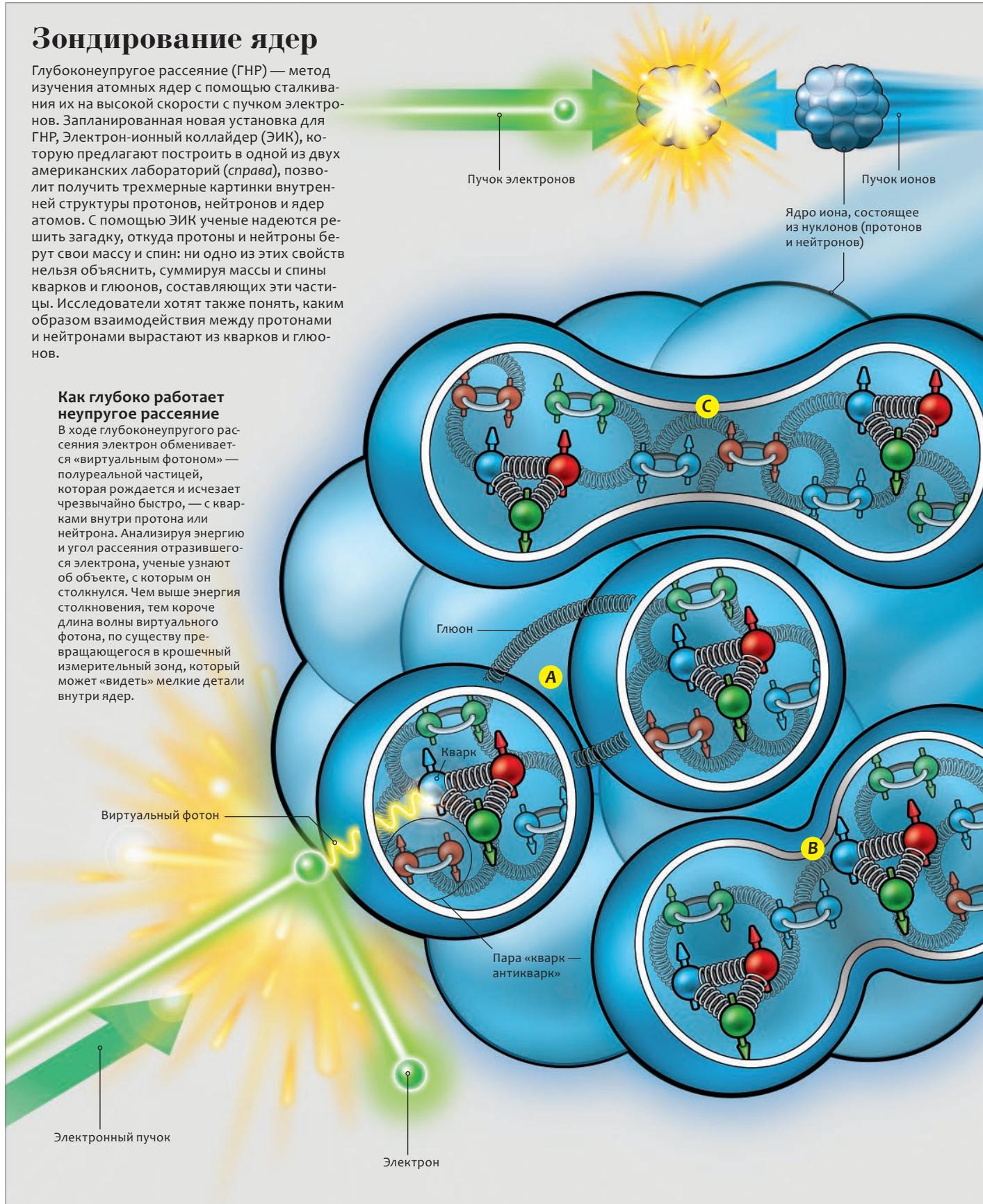
Ученые достаточно хорошо понимают, как из атомов строятся различные объекты и каким образом характеристики этих объектов определяются характеристиками составляющих их атомов. Безусловно, многое в нашей нынешней жизни зависит от наших знаний об атомах, электронах и об электромагнетизме — именно благодаря этим знаниям движутся наши автомобили и работают смартфоны. Ну так и что из того, что мы не понимаем, каким образом нуклоны образуются из кварков и глюонов? Во-первых, нуклоны по крайней мере в 10 тыс. раз меньше атома и поэтому нет простых способов их изучения. Во-вторых, характеристики нуклонов возникают в результате коллективного поведения кварков и глюонов. Фактически они — эмергентные явления (*эмергентность — наличие у какой-либо системы свойств, не присущих ее элементам. — Примеч. пер.*), результат интеракции множества сложных игроков, чьи взаимодействия изобилуют слишком большим числом деталей, чтобы нам можно было полностью понять их на этом уровне.

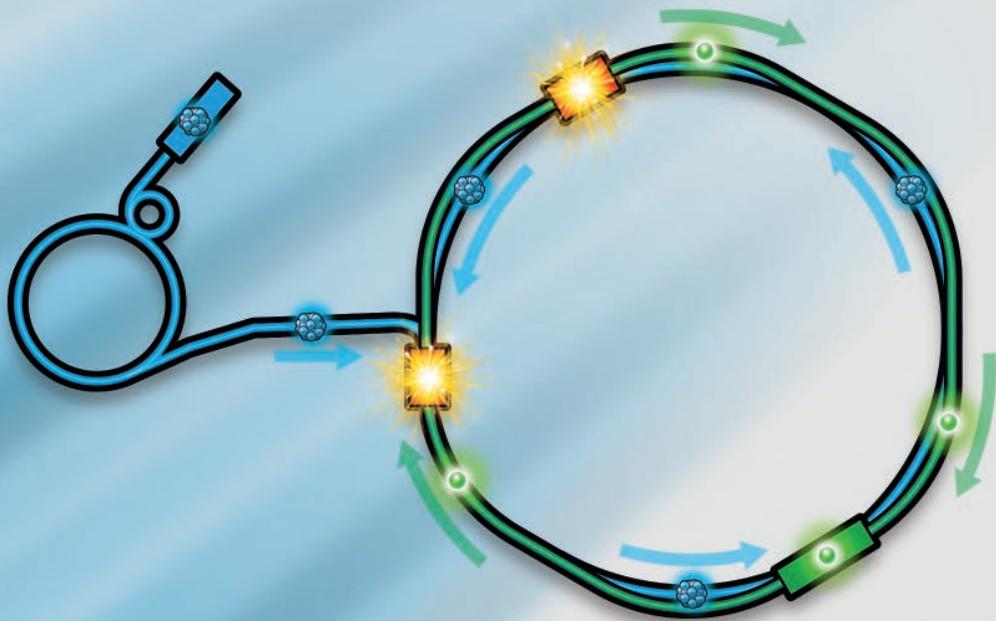
Зондирование ядер

Глубоконеупругое рассеяние (ГНР) — метод изучения атомных ядер с помощью столкновения их на высокой скорости с пучком электронов. Запланированная новая установка для ГНР, Электрон-ионный коллайдер (ЭИК), которую предлагают построить в одной из двух американских лабораторий (справа), позволит получить трехмерные картинки внутренней структуры протонов, нейтронов и ядер атомов. С помощью ЭИК ученые надеются решить загадку, откуда протоны и нейтроны берут свои массу и спин: ни одно из этих свойств нельзя объяснить, суммируя массы и спины кварков и глюонов, составляющих эти частицы. Исследователи хотят также понять, каким образом взаимодействия между протонами и нейтронами вырастают из кварков и глюонов.

Как глубоко работает неупругое рассеяние

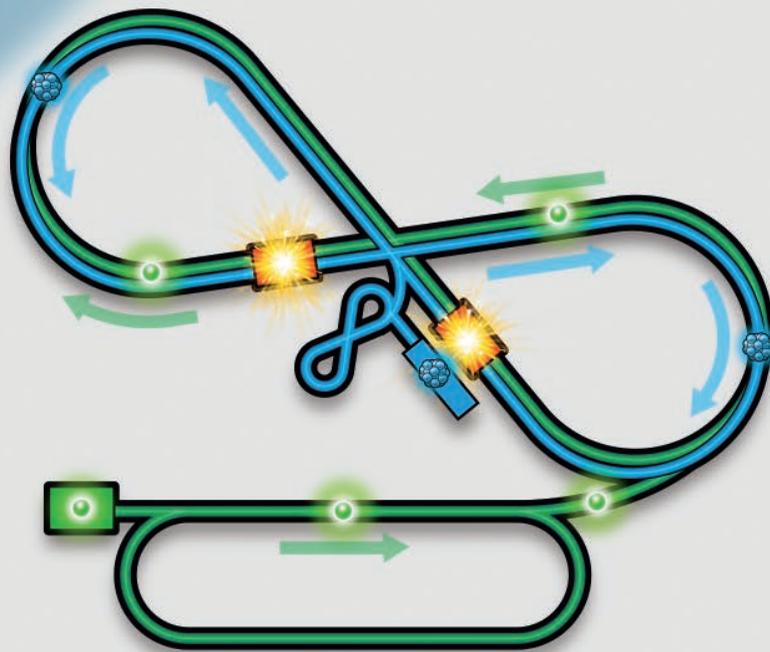
В ходе глубоконеупругого рассеяния электрон обменивается «виртуальным фотоном» — полуреальной частицей, которая рождается и исчезает чрезвычайно быстро, — с кварками внутри протона или нейтрона. Анализируя энергию и угол рассеяния отразившегося электрона, ученые узнают об объекте, с которым он столкнулся. Чем выше энергия столкновения, тем короче длина волны виртуального фотона, по существу превращающегося в крошечный измерительный зонд, который может «видеть» мелкие детали внутри ядер.





Возможная схема установки в Брукхейвене

Один из планов предполагает строительство ЭИК в Брукхейвенской лаборатории на Лонг-Айленде, используя существующее кольцо Релятивистского коллайдера тяжелых ионов (RHIC), на котором в настоящее время сталкиваются протоны и более тяжелые ядра. Добавив новый ускоритель электронов внутри туннеля RHIC, ученые смогут сталкивать электроны и ионы в двух точках (показаны со вспышками) кольца.



Возможная схема установки в Лаборатории Джефферсона

Другой вариант — продлить недавно модернизированный ускоритель электронов, названный CEBAF (зеленая петля), Национальной ускорительной лаборатории им. Томаса Джефферсона в городе Ньюпорт-Ньюс, штат Виргиния. Электронный пучок продолжит свой путь в «кольцо», имеющее форму восьмерки, к которому будет добавлен новый ускоритель ионов (окрашен в голубой цвет) в противоположном направлении. Столкновения двух пучков будут происходить в двух пунктах.

Ученые хотят знать, могут ли иногда протон и нейтрон делить между собой глюоны **A** или предпочитают их спаривать **B**, или же взаимодействовать, обмениваясь парами «кварк — антикварк» **C**.



Тяжелые ионы и поляризованные протоны ускоряются внутри Релятивистского коллайдера тяжелых ионов (RHIC) Брукхейвенской национальной лаборатории

Теория, описывающая эти взаимодействия, квантовая хромодинамика, была разработана в конце 1960-х — начале 1970-х гг. Это часть всеобъемлющей теории элементарных частиц, называемой Стандартной моделью, которая описывает все известные силы Вселенной (кроме гравитации). КХД утверждает, что сила сильного взаимодействия — сила, удерживающая вместе нуклоны, — переносится глюонами, точно так же как электромагнитные силы между электрически заряженными частицами переносятся фотонами, или частицами света. «Заряд», участвующий в сильном взаимодействии, называется «цвет» (отсюда и название «хромодинамика»). Кварки несут цветовой заряд и взаимодействуют друг с другом, обмениваясь глюонами. Но в отличие от электромагнетизма, где сами фотоны не имеют электрического заряда, у глюонов цветовой заряд есть. Следовательно, глюоны взаимодействуют с другими глюонами, обмениваясь новыми глюонами. Это допущение имеет далеко ведущие последствия. Петля обратной связи взаимодействия — причина того, почему КХД зачастую слишком трудна для вычислений.

Квантовая хромодинамика также отличается от более привычных теорий тем, что сила сильного взаимодействия становится тем слабее, чем теснее сближаются кварки. (В случае электромагнетизма все ровно наоборот: силы ослабевают, когда заряженные частицы удаляются друг

от друга.) На достаточно близком расстоянии внутри нуклона кварки испытывают настолько слабую силу, что ведут себя, как если бы они были свободны. За открытие этих странных следствий КХД физики Дэвид Гросс (David Gross), Дэвид Политцер (H. David Politzer) и Фрэнк Вильчек (Frank Wilczek) получили Нобелевскую премию по физике 2004 г. Когда кварки удаляются друг от друга, сила взаимодействия между ними быстро растет и становится настолько сильной, что кварки оказываются «заключены» внутри нуклона, — именно поэтому вы никогда не найдете кварк или глюон в одиночестве, вне протона или нейтрона. Ученые могут вычислять взаимодействия квантовой хромодинамики до тех пор, пока кварки находятся близко друг к другу и слабо взаимодействуют между собой; однако когда они расположены дальше друг от друга — на расстояниях, близких к радиусу протона, — сила становится слишком сильной, а теория — слишком сложной, чтобы быть полезной.

Чтобы расширить понимание квантового царства сил сильного взаимодействия, нам нужны дополнительные данные. Например, наша власть над царством атомов родилась не только из нашего понимания атомов и их взаимодействий, но и из нашего осмысления эмергентных явлений, которые возникают на вершине этих фундаментальных строительных блоков. Молекулярную биологию невозможно выстроить, исходя из наших знаний ее основ — теорий атомов и электромагнитного взаимодействия. Момент озарения случился, когда ученые открыли двойную спираль структуры ДНК. Что нам необходимо, чтобы добиться прогресса в мире кварков и глюонов, — это заглянуть внутрь нуклонов.

«Разглядывание» атомов

В первой половине XX в. физики научились «разглядывать» атомы методом, получившим название рентгеновской дифракции. Освещая образец пучком рентгеновских лучей и изучая интерференционную картину, которая возникает, когда лучи проходят через материал, ученые смогли увидеть его атомную кристаллическую структуру. Причина, по которой эта методика работает, заключается в том, что длина волны рентгеновского излучения сравнима с размером атома, что дает нам возможность исследовать нанометровую (10^{-9} м) шкалу расстояний, характерную для

атомов. Аналогично первоначально физики «увидели» кварки 50 лет назад в эксперименте, в котором электроны и протоны сталкивались в ходе явления, называемого глубоконеупругим рассеянием (ГНР).

При использовании данного метода электрон отражается от протона (или нейтрона, или ядра) и обменивается с ним виртуальным фотоном. Этот виртуальный фотон не совсем реален — он быстро рождается и исчезает как следствие квантовой механики, которая управляет взаимодействием элементарных частиц. Тщательно измерив энергию и угол рассеяния электрона, мы получаем информацию о той частице, от которой он отразился.

Длина волны виртуального фотона в экспериментах по ГНР — порядка фемтометра (1 фм = 10^{-15} м) — масштаб, соответствующий диаметру протона. Чем больше энергия столкновения, тем короче длина волны виртуального фотона, а чем короче длина волны, тем точнее измерительный зонд и выше пространственное разрешение. Если длина волны достаточно мала, электрон, по сути, отражается от одного из кварков внутри протона (а не всего протона как единого целого), что позволяет разглядеть внутреннюю структуру частицы.

Первым экспериментом по ГНР был совместный проект Стэнфордского центра линейных ускорителей с Массачусетским технологическим институтом на площадке, называвшейся тогда Стэнфордским центром линейных ускорителей. В 1968 г. проект представил первые доказательства существования кварков — открытие, за которое руководители эксперимента получили Нобелевскую премию 1990 г. по физике. В аналогичных экспериментах было обнаружено, что кварки внутри свободных протонов и нейтронов и те, что находятся внутри ядер, ведут себя совершенно по-разному. Более того, оказалось, что спины протона и нейтрона не складываются из суммы спинов составляющих их кварков, как это до того предполагали ученые. Сначала эффект был обнаружен у протонов и получил название «Кризис спина протона». Первым ГНР-коллайдером, на котором перед столкновением разгонялись как электроны, так и протоны, стал Адрон-электронный кольцевой ускоритель (*HERA*) исследовательского центра *DESY* (Немецкий электронный синхротрон) в Гамбурге, который работал с 1992 по 2007 г. Эксперименты на ускорителе *HERA* показали:

то, что мы считали простой конфигурацией из трех кварков внутри каждого протона и нейтрона, на самом деле превратилось в суп из частиц, в котором в мгновение ока появляются и исчезают множество кварков и глюонов. Ускоритель *HERA* существенно расширил наше понимание структуры нуклонов, но не смог разрешить спиновый кризис и не позволял получать пучки ядер со скоростью, необходимой для изучения поведения кварков и глюонов в ядрах.

Основной фактор, усложняющий все наблюдения в этом масштабе, — странность самой квантовой механики. Ее законы описывают субатомные частицы как облака вероятности: они не существуют в конкретном состоянии, в конкретном месте и строго определенном времени. Вместо этого мы должны рассматривать кварки как существующие в бесконечном числе квантовых конфигураций одновременно. Более того, мы должны учитывать явление квантового перепутывания, благодаря которому две частицы могут стать связанными таким образом, что их судьбы оказываются переплетенными даже после их расставания. Квантовое перепутывание, возможно, создаст проблему при наблюдении в масштабе ядра, поскольку кварки и глюоны, которые мы хотели бы наблюдать, рискуют стать квантово перепутанными с любым из инструментов, который мы используем, чтобы взглянуть на них; в случае глубоконеупругого рассеяния — с виртуальным фотоном. Представляется невозможным определить, что же мы подразумеваем под структурой нуклона, когда то, что мы находим, зависит от того, как мы его исследуем.

К счастью, к 1970-м гг. квантовая хромодинамика продвинулась вперед достаточно, чтобы ученые додумались, что мишень и зонд в эксперименте по ГНР можно разделить: условие, называемое факторизацией. При достаточно высоких энергиях ученые могут в значительной степени игнорировать эффекты квантового перепутывания в определенных обстоятельствах — настолько, чтобы стало возможным описать структуру протона в одном измерении. Это означает, что с помощью эксперимента по ГНР они могут измерить вероятность того, что любой данный кварк внутри протона вносит определенную долю в результирующий импульс нуклона.

Прогресс, достигнутый в последнее время в теории, позволил нам продвинуться

далее и описать внутреннюю структуру нуклонов более чем в одном измерении — оценить не только то, сколько кварки и глюоны вносят в его результирующий импульс, но также и то, насколько они перемещаются внутри нуклона с одной его стороны на другую.

Однако настоящий шаг вперед можно будет сделать, когда начнет работу Электрон-ионный коллайдер.

Электрон-ионный коллайдер

Электрон-ионный коллайдер даст возможность составить трехмерную карту внутренней структуры нуклона. Мы ожидаем, что коллайдер позволит измерить расположение и импульсы кварков и глюонов, а также величину, которую каждый из них вносит в суммарную массу и спин нуклона.

Ключевой прорыв ЭИК по сравнению с предыдущими экспериментами по ГНР — его яркость: например, он будет производить в 100–1000 раз больше столкновений в минуту, чем *HERA*. Кроме того, более высокая энергия сталкивающихся пучков в ЭИК позволит получить разрешение в несколько сотых диаметра протона, что даст возможность исследовать области, в которых большое число кварков и глюонов несут примерно 0,01% суммарного импульса протона. Электрон-ионный коллайдер также разрешит нам управлять направлением спина частиц в его пучке, и таким образом мы сможем изучать, как спин протона возникает из КХД-взаимодействий кварков и глюонов. Будучи включенными в рамки нашей современной теории, измерения на ЭИК дадут нам основания создать действительно трехмерную модель протона на основе кварков и глюонов.

У нас накопилось много вопросов, на которые мы надеемся получить ответ. Например, распределены ли составные части протона равномерно внутри него или же перемешаны друг с другом? Вносят ли некоторые из них больший вклад в массу и спин частицы, чем другие? Какую роль кварки и глюоны играют в связывании вместе протонов и нейтронов в ядра? Эти неясности только начинают исследоваться на существующих установках на фемтометровой шкале. ЭИК — первая машина, которая подведет нас к ответу на все эти вопросы.

Одна из самых больших загадок в нашей концепции структуры нуклона — что происходит, когда мы смотрим на эти частицы с помощью чрезвычайно тонкого

инструмента в очень мелком масштабе. Здесь начинают твориться странные вещи. КХД предсказывает, что когда энергия вашего зонда растет все выше и выше, вы будете обнаруживать все больше глюонов. Кварки могут излучать глюоны, а эти глюоны, в свою очередь, излучают новые глюоны, образуя цепную реакцию. Удивительно, но вовсе не воздействие изменения вызывает это глюонное излучение, а странность квантовой механики, которая говорит нам, что внутреннее содержимое протона меняется тем сильнее (просто глюонов становится все больше), чем ближе вы вглядываетесь.

Однако мы знаем, что это не может быть полным решением, потому что это означало бы, что материя растет без ограничений. Другими словами, атомы имели бы бесконечное количество глюонов, если бы вы рассматривали их все пристальнее. Предыдущие коллайдеры, включая *HERA*, замечали намеки на состояние «насыщения», в котором протон просто не может вмещать больше глюонов — и начинает рекомбинировать часть из них, прекращая тем самым рост их числа. Физики никогда еще однозначно не фиксировали насыщение, и мы не знаем величину порога, при которой это происходит. Некоторые вычисления дают основания предполагать, что при глюонном насыщении образуется новое состояние вещества — «конденсат цветного стекла» (*в русскоязычной физической литературе нет устоявшегося термина, соответствующего английскому color glass condensate; можно встретить переводы «конденсат цветного стекла» и даже «цветовой стеклообразный конденсат». — Примеч. пер.*) с весьма необычными свойствами. Например, плотность энергии глюонов может достигать беспрецедентной величины в 50–100 раз больше плотности энергии внутри нейтронных звезд. Чтобы достичь областей с самой высокой из возможных плотностью глюонов, на ЭИК вместо протонов будут разгоняться ядра тяжелых элементов, чтобы выявить это поразительное явление и изучить его в деталях.

Строительство ЭИК

Планы по строительству нового коллайдера получили твердую поддержку на последнем заседании (2015 г.) комитета по долговременному планированию американского сообщества физиков-ядерщиков, а также Министерства энергетики

США, которое в 2017 г. запросило независимую оценку ЭИК от Национальной академии наук, техники и медицины США (НАН США). В июле 2018 г. НАН США нашла научные аргументы в пользу строительства ЭИК фундаментальными, полными и своевременными.

Существуют два возможных пути строительства этой машины. Первый — усовершенствовать существующий Релятивистский коллайдер тяжелых ионов (RHIC) в Брукхейвене. Согласно этому плану, получившему название *eRHIC*, предполагается добавить электронный пучок внутри туннеля существующего ускорителя RHIC и сталкивать его в двух различных точках с одним из пучков существующего релятивистского коллайдера тяжелых ионов.

Другая возможность — использовать электронный пучок Ускорителя с непрерывным электронным пучком (CEBAF) Лаборатории Джефферсона (*на самом деле пучок электронов там квазинепрерывный и состоит из очень коротких сгустков «длиной» менее 1 пс.* — Примеч. пер.). В рамках проекта, получившего название «Электрон-ионный коллайдер Лаборатории Джефферсона» (JLEIC), пучок электронов с CEBAF будет направлен в туннель нового коллайдера, который должен быть сооружен по содействию.

Либо та, либо другая из этих установок позволит совершить огромный скачок в нашем понимании КХД и наконец-то даст визуальное представление о внутреннем строении нуклонов и ядер атомов. Любая из них должна помочь нам разобраться с вопросами спина, массы и других характеристик нуклонов, которые ставили нас в тупик до сих пор. И любая из них будет иметь возможность сталкивать много различных образцов ядер, включая тяжелые — золота, свинца и урана, что позволит нам выяснить, как меняется распределение кварков и глюонов, когда их нуклоны представляют собой часть более крупных ядер. Мы хотели бы, например, узнать, начинают ли некоторые из глюонов перекрывать друг друга так, что один принадлежит двум различным протонам.

Фемтотехника

В XXI в. сам размер атома — ограничивающий фактор в наших технологиях. Если не случится крупного научного прорыва, 10 нм (ширина примерно 100 атомов) — вероятно, будет минимальным размером компонента электронной схемы, и это дает

основания утверждать, что вычислительная мощность обычных компьютеров вряд ли будет расти с той же скоростью, что держалась более 50 лет.

В то же время нуклоны и их внутренняя структура существуют в масштабе в 1 млн раз меньше. Силы сильного взаимодействия, которые управляют этим царством, примерно в 100 раз сильнее электромагнитных, заставляющих работать современные электронные устройства, — по сути, это самая сильная сила во Вселенной. Возможно ли создать фемтотехнику, которая работала бы за счет управления кварками и глюонами? По некоторым оценкам, такого рода техника будет в миллион раз более мощной, чем нынешняя нанотехника. Конечно же, эта мечта — предмет для рассуждений весьма отдаленного будущего. Но чтобы прийти туда, сначала нам необходимо добиться глубокого понимания квантового мира кварков и глюонов.

ЭИК — единственная в мире экспериментальная установка, на которой можно будет получить данные, необходимые для самого полного понимания КХД. Однако строительство ЭИК не обойдется без серьезных проблем. Проект должен формировать очень яркий и в высокой степени сфокусированный пучок электронов, протонов и других атомных ядер в широком диапазоне энергий, чтобы в минуту происходило в 100–1000 раз больше актов соударения, чем на коллайдере HERA. Задачи по изучению спинов требуют, чтобы машина обеспечивала пучок частиц, чьи спины в максимально возможной степени направлены в одну сторону, которым можно управлять и на который можно воздействовать. Эти сложные задачи потребуют новых подходов, обещающих преобразить науку об ускорителях и могущих оказаться полезными не только для ядерной физики, но также и при создании будущих ускорителей, для использования в медицине, материаловедении и физике элементарных частиц. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Венугопалан Р., Ульрих Т., Энт Р. Клей, на котором держится мир // ВМН, № 7, 2015.
- An Assessment of U.S.-Based Electron-Ion Collider Science. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. National Academies Press, 2018. <https://doi.org/10.17226/25171>



ЭТОЛОГИЯ

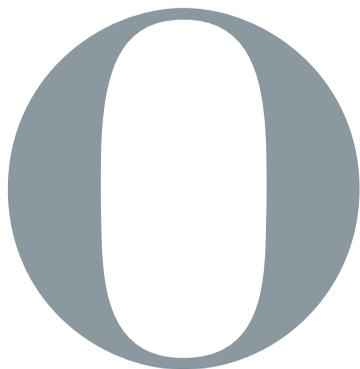
СОНИ В ОДНОМ ГЛАЗУ

Почему у дельфинов, тюленей и других животных появилась способность спать так, чтобы половина мозга при этом бодрствовала

Джан Гастоне Машетти

ОБ АВТОРЕ

Джан Гастоне Машетти (Gian Gastone Mascetti) — старший научный сотрудник в области нейрофизиологии отделения общей психологии Падуанского университета в Италии. Занимается исследованиями сна, в частности изучает, как сон связан с распределением функций между полушариями мозга.



Одна из самых удивительных особенностей живых организмов, в частности растений и животных, заключается в том, что их физиологические процессы и поведение приспособлены к колебаниям от дневного света к ночной тьме. В мозге есть часы, синхронизированные с внешними сигналами и вызывающие биологические изменения в течение суток. Это называется циркадным ритмом (от лат. *circa* — «около» и *dies* — «день»). Таким образом, вращение планеты отражается на работе наших нейронных связей.

Цикл «сон — бодрствование» относится к типичным циркадным ритмам. Во время бодрствования мы воспринимаем сенсорную информацию и активно двигаемся. Во время сна наши органы чувств отключаются от внешнего мира и мы прекращаем движения. Такая периодическая потеря сознания хорошо заметна на электроэнцефалограмме (ЭЭГ). При глубоком сне наблюдаются высокоамплитудные низкочастотные волны. Для бодрствования же, напротив, характерна низкоамплитудная и высокочастотная активность. Однако многие аспекты сна остаются загадкой. Почему животное должно на несколько часов выключать свою чувствительность и подвижность, становясь легкой добычей для хищников? Еще более остро этот вопрос

стоит для водных млекопитающих, поскольку им сложнее регулировать дыхание и температуру во время сна.

Некоторые животные решили проблему удивительным образом: у них развилась способность спать только одной половиной мозга и бодрствовать другой. Такое поведение получило название «однополушарный медленноволновый сон» (ОМС). Существуют и такие виды, которые предпочитают спать обоими полушариями, прибегая к ОМС только в определенных обстоятельствах. Морские млекопитающие, некоторые птицы и, возможно, рептилии, находясь в наполовину «включенном» состоянии, держат открытым один глаз. А недавно исследователи обнаружили рудиментарную форму однополушарного сна и у людей.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Во время сна притупляются чувства и прекращаются движения. Возникает вопрос, почему все животные регулярно отключают большую часть мозговой деятельности, становясь удобной добычей для хищников.
- У некоторых животных для решения этой проблемы развилась способность спать одной половиной своего мозга, в то время как вторая остается в бодрствующем состоянии. Такое явление получило название «однополушарный медленноволновый сон».
- Подобная форма сна удобна для научных исследований. Можно работать со спящей половиной мозга, а другая половина будет служить контрольной. Это можно использовать даже при изучении нарушений сна у человека.

Половинчатый сон открывает удивительную перспективу в науке о сне. Можно исследовать спящую половину мозга и при этом использовать бодрствующую как контрольную. Способность дельфинов и некоторых птиц сохранять хорошее самочувствие при относительно небольшом количестве сна можно использовать для поиска способов лечения таких нарушений сна у человека, которые затрагивают одно полушарие сильнее, чем другое.

Спит, но не совсем

Изучение однополушарного сна началось в 1964 г., когда исследователь с неоднозначной репутацией Джон Лилли (John Lilly), увидев, что дельфины во время ежедневного отдыха закрывают только один глаз, решил, что эти животные спят только одним полушарием. Лилли предположил, что во время сна дельфины могут слышать и видеть все окружающее. Чтобы понять, что происходит при этом в мозгу китообразных, потребовались дальнейшие эксперименты.

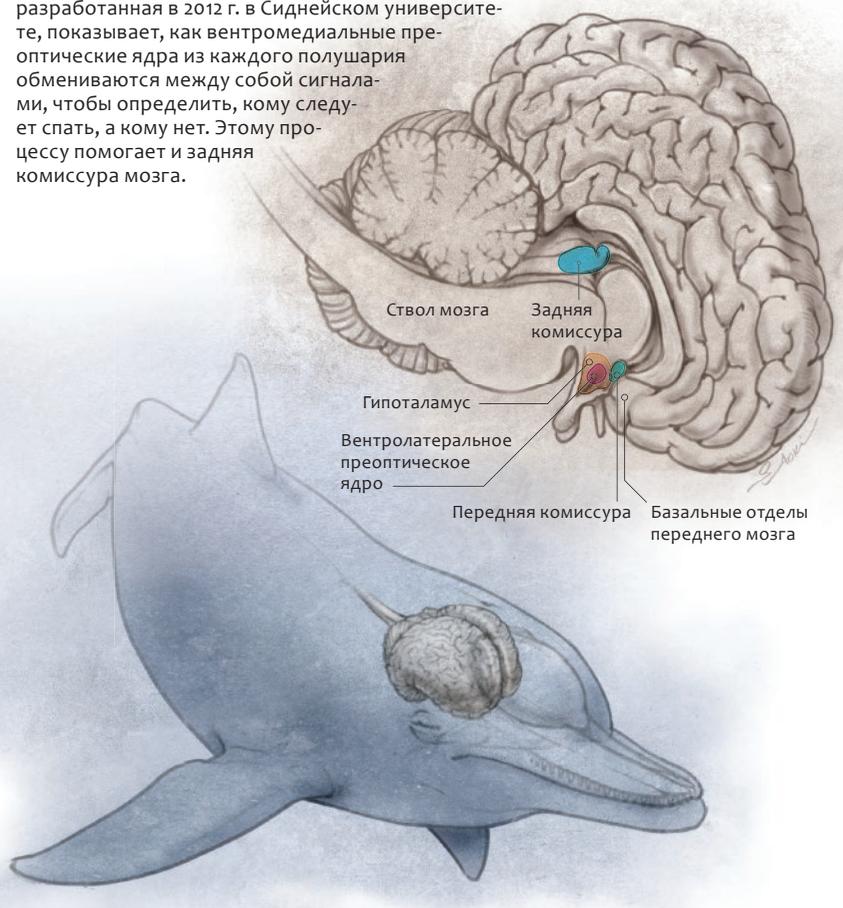
Китообразные, к которым относятся киты, дельфины и морские свиньи, до сих пор остаются основным объектом изучения однополушарного сна. Эти животные унаследовали

от своих сухопутных предков две физиологические особенности: дыхание легкими и терморегуляционные механизмы, поддерживающие постоянную температуру тела в воде. По-видимому, именно однополушарный сон позволил им сохранять эти особенности в водной среде обитания.

Позднее сотрудник Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН Лев Мухаметов с коллегами более подробно по сравнению с Лилли изучили происходящее в мозге китообразных. Они всесторонне исследовали сон у афалин. На записи ЭЭГ ученые обнаружили, что одно полушарие животного было в состоянии медленноволнового сна, а другое — бодрствования. В редких случаях можно было наблюдать, как спят оба полушария (двуполушарный медленноволновый сон),

Наполовину включен, наполовину выключен

Разные области мозга, в том числе ствол, гипоталамус и базальные отделы, взаимодействуют в процессе смены сна и бодрствования. У дельфинов четкая координация между правым и левым полушариями позволяет одной стороне спать, пока другая бодрствует. Модель однополушарного сна, разработанная в 2012 г. в Сиднейском университете, показывает, как вентромедиальные преоптические ядра из каждого полушария обмениваются между собой сигналами, чтобы определить, кому следует спать, а кому нет. Этому процессу помогает и задняя комиссура мозга.



и исследователи не нашли никаких однозначных признаков фазы сна с быстрыми движениями глаз (БДГ-сон), который связан со сновидениями.

Во время ОМС бодрствующее полушарие контролирует плавание и подъем к поверхности для дыхания. Как и предполагал Лилли на основе своих беглых наблюдений, открытый глаз, связанный с бодрствующим полушарием, позволяет животному замечать хищников и не отставать от своих сородичей, пока второе полушарие отдыхает. Когда дельфины плавают, открытый глаз поддерживает зрительный контакт с другими членами группы, и как только партнер переходит на другую сторону, открывается другой глаз, а этот закрывается. Подобное наблюдала Патриция Доун Гоули (P. Dawn Goley) из отделения биологических

наук Государственного университета им. Гумбольдта в 1999 г., а также Гуидо Ньоне (Guido Gnone) со своими коллегами из Аквариума Генуи в 2001 г.

Когда дельфины попадают в холодную воду, это способствует потере тепла. По наблюдениям сотрудников Витватерсрандского университета в Йоханнесбурге Пранешри Пиллай (Praneshri Pillay) и Пола Менгера (Paul Manger), удержание одного полушария в состоянии бодрствования позволяет животным поддерживать свою температуру за счет движений плавниками и хвостом и плавания у поверхности во время сна.

Мы знаем, что у китообразных, как и у других животных, цикл «сон — бодрствование» обеспечивается многими взаимодействующими структурами, среди которых ствол мозга, гипоталамус и базальные отделы переднего мозга. Как

Находясь в воде во время однополушарного сна, морские котики принимают такую позу, которая позволяет им спать, дышать и отслеживать приближающихся хищников

именно регулируется однополушарный сон, пока остается загадкой, хотя на этот счет есть некоторые идеи. В 2012 г. Дэвид Кедзиора (David Kedziora) с коллегами из Сиднейского университета разработали математическую модель для описания сна у дельфинов. Согласно модели, вентролатеральные преоптические ядра с обеих сторон гипоталамуса обмениваются между собой сигналами, регулируя, когда то или иное полушарие погрузится в состояние сна. Видимо, именно тормозные сигналы, передаваемые во второе полушарие, запускают в нем сон при сохранении бодрствования в первом. В процесс также вовлечены структуры, лежащие более глубоко в мозге, такие как задняя комиссура. У дельфинов она очень крупная, что позволяет сделать предположение о ее роли в регуляции сна. Модель сиднейских ученых задает нейробиологам направление для исследований проблемы того, как мозг справляется со столь тонкой задачей, как переключение сна с одного полушария на другое.

Важную роль играют и сигналы из окружающей среды. Нейроны гипоталамуса, управляющие сном, способны реагировать на температуру, изменяя частоту разрядов в зависимости от повышения или понижения температуры мозга. И действительно, как обнаружил в 1982 г. Мухаметов, во время ОМС температура спящего полушария снижается, а бодрствующего — остается на прежнем уровне.

Необычное приспособление

Китообразные эволюционировали от наземного предка, общего с бегемотами и другими копытными. Переход из наземной среды в водную был постепенным, по-видимому, имелся период полуводного существования. В результате сформировались важные физиологические и поведенческие приспособления. Следовательно, и сон китообразных можно рассматривать как пример особой адаптации, обеспечивающей компромисс между потребностью во сне и выживаемостью.

На схожие компромиссы идут и другие животные. Например, тюлени в процессе эволюции по-разному решали проблему сна и дыхания на суше и в воде. В семействе настоящих тюленей (*Phocidae*), к которым относятся гренландские тюлени и морские слоны, ОМС нет ни у кого.

Однако у северных морских котиков из семейства ушастых тюленей (*Otariidae*) все по-другому. Олег Лямин из Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН показал, что в отличие от дельфинов, у которых редко встречается двуполушарный сон и, видимо, почти никогда не встречается БДГ-сон, у котиков есть разнообразные формы сна как в воде, так и на суше. На суше преобладает двуполушарный сон. В воде увеличивается доля однополушарного сна, при этом БДГ-сон сокращается или даже почти исчезает.

В воде, во время ОМС, эти животные принимают такую позу, которая позволяет им спать, дышать и отслеживать приближающихся хищников. Котики ложатся на бок, опускают один лап в воду и постоянно им гребут. Три других лапы в это время находятся на воздухе, сокращая потери тепла. Ноздри животного при этом расположены над водой так, что котик может дышать. Полушарие, противоположное активному лапу (и открытому глазу), бодрствует, позволяя животному грести и поддерживать позу. Во время однополушарного сна на суше котики могут наблюдать

за хищниками и скоординировать свои действия с сородичами, но бодрствующее полушарие при этом не занимается контролем дыхания, температуры тела или движением конечностями.

Некоторые птицы тоже умеют спать одним полушарием, одновременно удовлетворяя потребность в отдыхе и обеспечивая готовность к защите. У них ОМС нередко встречается вместе с двуполушарным и БДГ-сном. В 1996 г. Ядвига Шимчак (Jadwiga Szymczak), которая тогда работала в польском Университете Николая Коперника, зарегистрировала на ЭЭГ медленноволновую активность в одном полушарии у черного дрозда. А в 2001 г. то же самое сделал на голубях Нильс Раттенборг (Niels Rattenborg) с коллегами из Университета штата Индиана. Он же в 1999 г. обнаружил, что кряквы спят одним полушарием, а другим — отслеживают угрозу. У уток, которые находились на периферии группы и держали один глаз открытым, ОМС встречался на 150% чаще, чем у птиц, находящихся в центре. Марк Элгар (Mark Elgar) из Мельбурнского университета в Австралии опубликовал в 1989 г. исследование, где показал, что степень бодрствования животного снижается по мере продвижения к центру группы или по мере увеличения ее размеров.

Разные стратегии сна используют и мигрирующие птицы во время длинных безостановочных перелетов. В 2016 г. Раттенборг, который тогда уже работал в Институте орнитологии Общества Макса Планка в Германии, со своими коллегами изучил однополушарный и двуполушарный сон у больших фрегатов во время десятидневного перелета. В каждом эпизоде ОМС-активность, соответствующая бодрствованию, наблюдалась в полушарии, противоположном той стороне, с которой летела остальная стая. Это означает, что открытый глаз следил, куда движется группа. Кроме того, в 2006 г. сотрудник Государственного университета Боулинг-Грин Томас Фукс (Thomas Fuchs) выяснил, что дрозд Свенсона компенсирует потерю сна во время ночных перелетов, увеличивая общую его продолжительность за счет микроэпизодов, когда птица сидит на ветке с одним закрытым глазом.

А как у нас?

У людей нет классического однополушарного сна, однако нечто похожее иногда встречается. Масако Тамаки (Masako Tamaki) из Брауновского университета со своими

коллегами записала ЭЭГ у людей, спавших в незнакомой обстановке. Результаты исследования Тамаки опубликовала в 2016 г. Ученые выявили на ЭЭГ низкочастотную активность в правом полушарии, что свидетельствовало о глубоком сне, при этом в левом полушарии такая активность была выражена слабее, что говорило о его большей готовности к бодрствованию. Более того, левое полушарие было проще разбудить. Такая асимметрия, получившая название «эффект первой ночи», пропадает на вторую ночь. Видимо, так поддерживается необходимый уровень бдительности в незнакомом месте. Тут вспоминаются матери, быстро просыпающиеся от криков или других звуков, которые издает их ребенок.

После первой ночи вдали от дома мы можем почувствовать, что не выспались. Однако другие животные, которые спят одним полушарием, хорошо к этому приспособились. Животные, у которых есть ОМС, проводят меньше времени во сне по сравнению с теми, кто спит обоими полушариями, и теми, у кого есть БДГ-сон.

При этом их способность плавать, летать, питаться и общаться с сородичами остается неизменной. Почти две трети дня дельфины бодрствуют, а остальное время проводят в состоянии ОМС, распределяя время сна между двумя полушариями. Однако незаметно, чтобы восстановление тела и мозга при этом как-то страдало, даже несмотря на отсутствие БДГ-сна.

В 1997 г. Мухаметов с коллегами писал, что дельфины во время исследований сна всегда выглядели здоровыми. При содержании в неволе, где ученые могут наблюдать за животными, дельфины обучались решать сложные задачи. У фрегатов во время длительных перелетов заметно снижалась общая продолжительность сна, но при этом сохранялся высокий уровень внимательности и они эффективно управляли движениями.

Некоторые животные, видимо, используют полусон по очереди. У крякв, которые держат один глаз открытым, карауля группу, количество сна снижается, но при этом не отмечается поведенческих нарушений. Эти птицы на следующий день передают свою наблюдательную роль другим особям. Однополушарный сон продолжает вызывать удивление у научного сообщества — это пример того, насколько разнообразными могут быть способы обеспечения ежедневного отдыха.

Первоначальный интерес к ОМС был вызван исследованиями в природе, но сейчас работа идет и в лаборатории, где изучается роль сна в развитии мозга сразу после рождения. В 1999 г. моя научная группа в отделении общей психологии Падуанского университета в Италии обнаружила, что цыплята значительно чаще спят только левым полушарием в первую неделю после появления на свет. В эти дни они сталкивались с такими новыми стимулами, как формы и цвета, и использовали левое полушарие, чтобы впервые обработать эту информацию своим молодым мозгом. По-видимому, сон играет важную роль в упорядочивании недавно выученного.

Продолжительность правополушарного сна увеличивалась на второй неделе жизни цыплят, когда это полушарие сталкивалось с анализом пространства и упорядочиванием событий. Когда мы обучали цыплят

Исследования однополушарного сна показывают, как разные виды животных соблюдают баланс между потребностью в отдыхе и необходимостью защитить себя от хищников. Сон одним полушарием — блестящее решение такой дилеммы

различать цвета, у птиц увеличивалась продолжительность левополушарного сна с закрытым правым глазом и медленно-волновой активностью слева, потому что именно данное полушарие отвечает за восприятие цветов. Левый глаз цыплята использовали для обучения пространственной задаче выбора одного из четырех контейнеров в углах их клетки. Им нужно было найти контейнер с отверстием сверху, в котором было пищевое подкрепление. Когда тест закончился, у цыплят был более выражен правополушарный сон (левый глаз закрыт, медленно-волновая активность справа), чтобы обеспечить отдых той части мозга, которая специализируется на подобных задачах.

Таким образом, наиболее активное полушарие для своего восстановления проводит больше времени в спящем состоянии,

независимо от того, оказывается ли сон в целом однополушарным или двуполушарным. Тем временем другое полушарие через открытый глаз следит за окружающим пространством и хищниками. Действительно, движение темного объекта над клеткой с цыплятами приводило к тому, что они моментально просыпались, вскакивали и начинали издавать звуки тревоги. Их бдительность оставалась ненарушенной, но она и не отвлекала от сна, во время которого упорядочиваются интенсивные сенсорные впечатления первых дней жизни цыплят в новом для них мире.

И, наконец, изучение животных, спящих одним полушарием, может стать полезным для понимания сна и, возможно, решения некоторых его проблем. Апноэ и другие расстройства сна иногда влияют на одно полушарие сильнее, чем на другое. Исследования однополушарного сна показывают, как разные виды животных соблюдают баланс между потребностью в отдыхе и необходимостью защитить себя от хищников. Сон одним полушарием — блестящее решение такой дилеммы, позволяющее животному одновременно находиться в сознательном и бессознательном состоянии. Современные исследования однополушарного сна перекликаются через тысячелетия с часто цитируемой фразой из фрагментов Гераклита: «Спящие — действующие и содействующие участники происходящего в космосе».

Перевод: М.С. Багоцкая

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Cetacean Sleep: An Unusual Form of Mammalian Sleep. Oleg I. Lyamin et al. in *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, Vol. 32, No. 8, pages 1451–1484; October 2008.
- Physiologically Based Quantitative Modeling of Unihemispheric Sleep. D.J. Kedziora et al. in *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 314, pages 109–119; December 7, 2012.
- Unihemispheric Sleep and Asymmetrical Sleep: Behavioral, Neurophysiological, and Functional Perspectives. Gian Gastone Mascetti in *Nature and Science of Sleep*, Vol. 8, pages 221–238; 2016.
- Evidence That Birds Sleep in Mid-Flight. Niels C. Rattenborg et al. in *Nature Communications*, Vol. 7, Article No. 12468; August 3, 2016.
- Sleep in the Northern Fur Seal. Oleg I. Lyamin et al. in *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 44, pages 144–151; June 2017.

Всё, всем, всегда ДОСТУПНО



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

ЦИФРОВЫЕ РЕСУРСЫ

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

www.sciam.ru



Google play



**В мире
науки** SCIENTIFIC
AMERICAN

Ежемесячный
научно-информационный
журнал

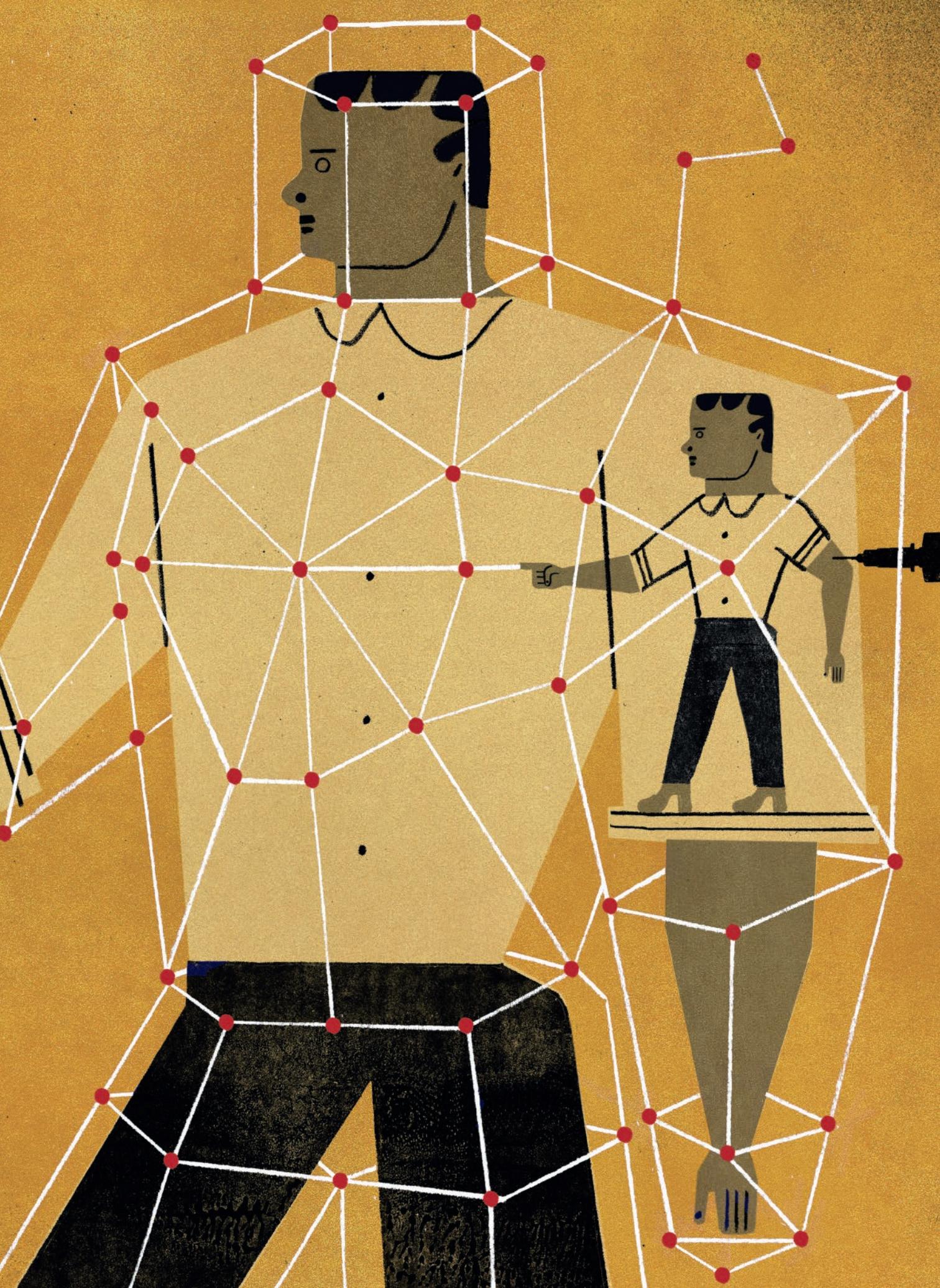
ИММУНОЛОГИЯ

Другой ВЗГЛЯД на ВАКЦИНЫ

Согласно одной из гипотез, правильно организованная иммунизация может защитить организм сразу от нескольких инфекционных заболеваний, а не только от того, против которого вакцина была разработана

Мелинда Уэннер Мойер





ОБ АВТОРЕ

Мелинда Уэннер Мойер (Melinda Wenner Moyer) — пишущий редактор *Scientific American*. В мае 2018 г. она написала статью «Американская эпидемия» (*American Epidemic*), получившую второе место в номинации «Политика в области здравоохранения» Премии за выдающиеся достижения в сфере журналистики, посвященной охране здоровья (*Awards for Excellence in Health Care Journalism*).



Весна прошлого года на западе Африки. Полуденный зной смягчают лишь порывы ветра, сопровождаемые ударами плодов манго о железную крышу Центра здоровья в Бисау, самом большом городе крошечной страны Гвинея-Бисау. Здесь уже шесть месяцев не было дождя, и земля цвета ржавчины покрылась глубокими трещинами. Внутри здания воздух сух и неподвижен; посетители — женщины и едва начавшие ходить ребятишки — обливаются потом.

Сидящая на коленях матери 18-месячная Мария, девочка с тонкими косичками, беспокойно поглядывает на меня. (Имя ребенка изменено.) Карлито Бале (Carlito Balé), врач с вкрадчивым голосом, в белоснежной рубашке с короткими рукавами, разговаривает с матерью на смеси португальского языка с местным африканским диалектом. Бале объясняет ей, что Мария входит в число кандидатов на участие в клинических испытаниях, цель которых — выяснить, защищает ли вакцина от кори, введенная в больших дозах, не только от этого заболевания, но и от многих других серьезных детских инфекционных болезней.

В США, где угрожающие жизни инфекции встречаются редко, для таких испытаний трудно набрать необходимое число волонтеров. Но в Гвине-Бисау, где люди десятилетиями живут в условиях дефицита пищевых продуктов и медикаментов, желающих хоть отбавляй. Страна относится к числу беднейших в мире и, по данным ЦРУ, находится на четвертом месте по детской смертности среди 225 стран. Часто матери не дают имени младенцам по несколько месяцев, поскольку каждый двенадцатый не доживает до своего первого дня рождения.

Исследователи, организовавшие испытания, — антрополог Питер Ааби (Peter Aaby) и врач Кристин Бенн (Christine Benn) — получили данные, согласно которым ряд специфических вакцин

защищают организм сразу от нескольких инфекций. За десятки лет они опубликовали сотни статей, в которых высказывалось предположение, что живые ослабленные (аттенуированные) вакцины могут предотвращать не только инфекционные заболевания, против которых их исходно разрабатывали, но и респираторные заболевания (в том числе пневмонию), заражение крови (в том числе сепсис) и кишечные инфекции. В обзоре, опубликованном в 2016 г. под эгидой ВОЗ, представлены результаты анализа 68 публикаций на эту тему. Из обзора следовало, что вакцинация против кори и туберкулеза приводит «к большему суммарному снижению смертности, чем можно было ожидать, если бы она была направлена напрямую на эти заболевания».

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Считается, что вакцины эффективны в отношении только тех патогенов, против которых их разрабатывали, но целый ряд исследований указывает на то, что спектр их действия гораздо шире.
- В данной статье утверждается, что живые вакцины могут уменьшить детскую смертность на 50%.
- Авторы исследований также отвечают своим оппонентам и указывают на сложность проблемы.

Многосторонность действия живых вакцин имеет значение не только для Африки. Так, в 2017 г. исследователи из Центров по контролю и профилактике заболеваний США сообщили, что дети в возрасте от 16 до 24 месяцев вдвое реже попадают в больницу по поводу нецелевых для вакцины болезней, если при последней прививке использовалась живая вакцина, а не инактивированная. Согласно последним данным, широта спектра действия живых вакцин объясняется тем, что они активируют ту часть иммунной системы, которая противостоит любому «агрессору». «Несмотря на то что мы пока очень далеки от понимания деталей этого феномена, я не сомневаюсь, что все вакцины в той или иной степени оказывают многоцелевое действие, и тому есть свидетельства разного рода», — говорит Фрэнк Шанн (Frank Shann), врач-педиатр из Королевской детской больницы в Мельбурне.

Другие исследователи менее категоричны. Работы датских ученых Ааби и Бенн по большому счету противоречивы, в большинстве проведенных ими исследований наличие причинно-следственной связи неочевидно. По словам Пола Файна (Paul Fine), эпидемиолога из Лондонской школы гигиены и тропической медицины, «она подразумевается». Возможно, дети, получившие живую вакцину, живут дольше по причинам, не имеющим ничего общего с вакцинацией. Например, состояние их здоровья лучше, чем у остальных. Чтобы проверить, так ли это, Ааби и Бенн организуют испытания, в которых должна участвовать Мария. Предполагается подобрать детей определенного возраста и нормального состояния здоровья, но одни получают стандартную дозу вакцины против кори, а другие — повышенную.

По словам Ааби, его с Бенн исследования не находят понимания у общественности, поскольку предполагают применение живой вакцины после любой череды вакцинаций, выходят за рамки общепринятой практики и вызывают беспокойство у родителей в связи с тем, безопасно ли это. «Органы здравоохранения не хотят нас выслушать, и я могу понять почему», — говорит Ааби. В итоге для многих приверженцев традиционных методов вакцинации он персона нон грата. Убеленный сединами 74-летний ученый оказался в положении человека, о котором говорят «один в поле воин».

Тем временем в реальности идеи Ааби и Бенн близки к воплощению в жизнь. В 2014 г. ВОЗ заявила, что неспецифический эффект вакцинации



Кристина Бенн и Питер Ааби у своего дома в Гвинеи-Бисау. Большинство своих исследований они выполнили в этой стране.

«представляется весьма правдоподобным и повсеместным» и достоин большого внимания. И в апреле 2017 г. организация объявила о намерении пересмотреть план проведения двух многолетних клинических испытаний, чтобы проверить свои предположения. Впрочем, они пока не начинались. Тем временем научное сотрудничество двух наших исследователей переросло в нечто большее, и теперь они как семейная пара проводят собственные исследования. За одним из них наблюдает мама Марии. Она разрешила включить свою дочь в число испытуемых. Я наблюдала, как Ааби вскрыл конверт с дюжиной маленьких запечатанных конвертов, из которых женщина выбрала один. Вскрыв его, Бале объявил, что Мария попала в группу, члены которой получают вакцину в повышенной дозе, а не плацебо, как члены контрольной группы. Мать отнесла Марию в процедурную комнату, где их ждала приветливая медсестра со шприцем наготове.

Ключ к разгадке

В 1979 г., вскоре после запуска проекта в Бисау, молодой Ааби стал свидетелем того, как корь убивает каждого четвертого ребенка. Тогда он впервые увидел ее жертву — умершего младенца.

В те времена вакцинация детей в Африке была редкостью. По оценкам ВОЗ за 1980 г., первую дозу

живой вакцины против кори получили всего 6% детей, а инактивированной вакцины против дифтерии, столбняка и коклюша (DTP) — 8%. Нельзя сказать, что последняя была какой-то новинкой, она получила лицензию еще в 1949 г., и тем не менее спустя 31 год ее ввели всего каждому 12-му ребенку. Помимо вакцин против кори и DTP существовала также живая противотуберкулезная вакцина, так называемая *bacillus Calmette-Guérin* (BCG), и живая вакцина против полиомиелита. В этот же период в США живую вакцину против кори получили 86% детей, а инактивированную DTP-вакцину — 95%. Сегодня уровень вакцинации в Африке выше, чем в 1980-х гг., но отстаивание от США по-прежнему велико.

В 1978 г., за год до исторической эпидемии кори, одна из шведских организаций отправила Ааби в Гвинею-Бисау для изучения проблемы дефицита пищевых продуктов. Когда корь распространилась среди городского населения, Ааби раздобыл по своим каналам импортную вакцину и стал делать прививки местным детям, пытаясь снизить смертность. Это был смелый шаг: в то время органы здравоохранения считали, что кампания по вакцинации детей в Африке обойдется слишком дорого и потребует больших усилий. В 1981 г. в журнале *Lancet* появилась статья с анализом последствий вакцинации против кори в Заире. Авторы заявляли, что в будущем следует «дважды подумать, прежде чем начинать аналогичную кампанию в отсутствие необходимых финансовых ресурсов». От кори погибают прежде всего ослабленные дети; если вакцинация предотвратит их заражение, они все равно погибнут в ближайшее время по какой-либо другой причине.

Весь опыт Ааби опровергал эту концепцию: в 1979 г., в самом начале эпидемии, от кори умерло 13% детей в возрасте от шести месяцев до трех лет; в 1980 г., когда появилась вакцина, эта цифра снизилась до 5%. Удивительно, что смертность по другим причинам упала за это же время на одну пятую. Даже после прекращения эпидемии иммунизированные дети оставались более устойчивыми к другим инфекциям, чем их непривитые сверстники. «Это был один из тех моментов, когда мы вдруг увидели нечто совершенно непредставимое», — заявил Ааби. Вместе с коллегами он направил в *Lancet* заметку, в которой говорилось о несостоятельности теории, согласно которой кампания по иммунизации детей в Африке бесполезна. Это была первая публикация Ааби в медицинском журнале, и он был окрылен.

Сегодня у него более 100 работ, посвященных одной только вакцине против кори. Одна из причин наличия столь внушительного числа публикаций — реализация его программы исследования выживаемости, *Bandim Health Project*, продукта сотрудничества между Министерством

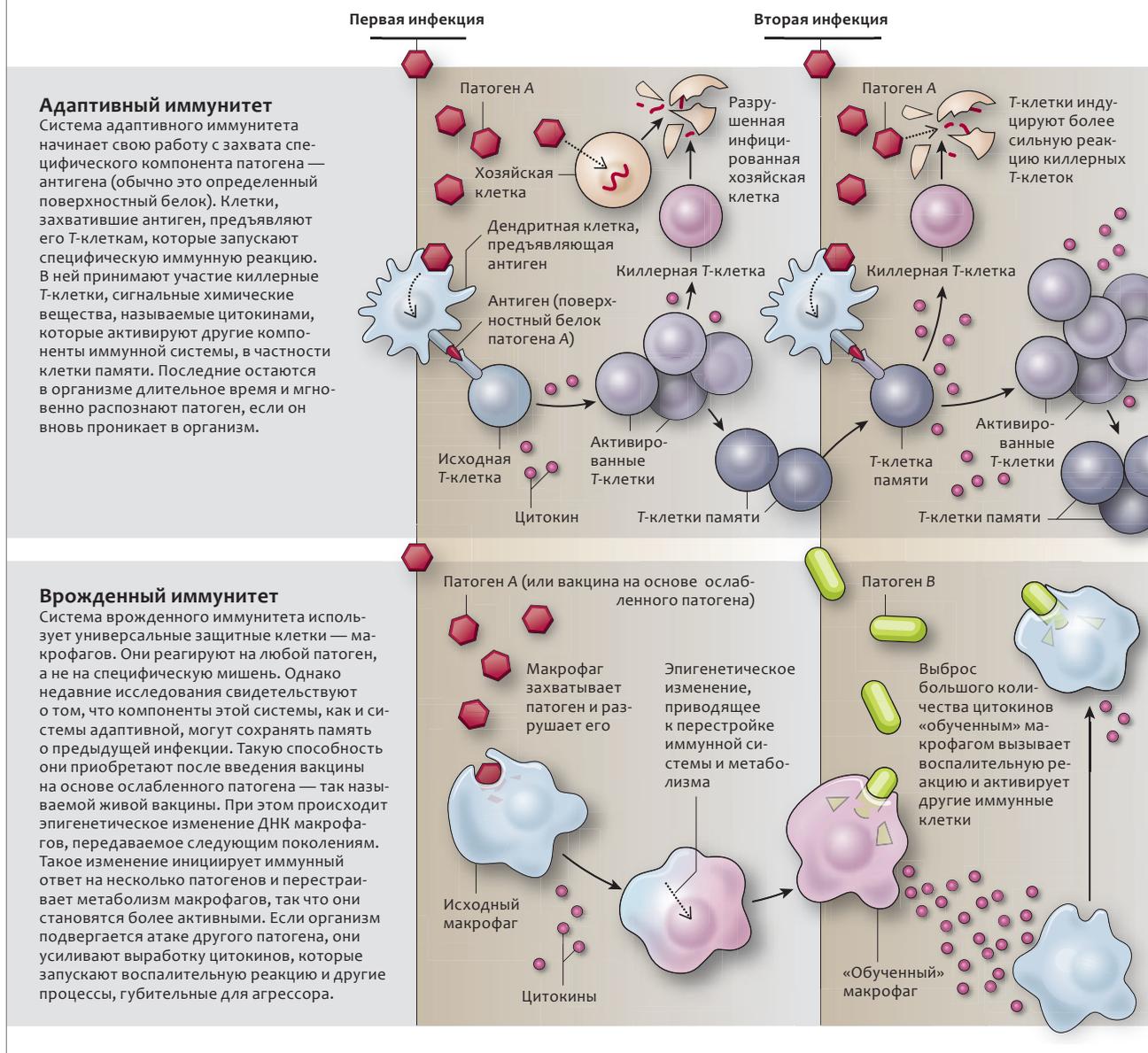
здравоохранения Гвинеи-Бисау и Датским государственным институтом сывороток. В течение более 40 лет в рамках проекта регистрировались все случаи беременности, рождения и смерти в Бандиме, промышленном регионе Бисау, а также в пяти других промышленных регионах. Ааби с коллегами следили за состоянием здоровья более 500 тыс. жителей этих мест и собрали данные о госпитализации, вакцинации и других показателях, связанных с состоянием системы здравоохранения, в частности с использованием противомоскитных сеток. В один из моих визитов в Бисау во время прогулки с Ааби к нам подошла женщина с ребенком на руках и сказала, что помнит, как он посещал ее — маленькую девочку — 30 лет назад. Коллеги называют Ааби *Homem Grande*, что в переводе означает «Большой человек».

Ааби всегда был «одиноким волком»: многие годы он проводил почти все свое время в офисе, оборудованном в его собственном доме. Но в последние 15 лет положение изменилось. В 1992 г. Кристин Бенн, студентку Медицинской школы при Орхусском университете в Дании, направили к Ааби, чтобы он помог ей исследовать, взаимодействует ли витамин А, обычно назначаемый вместе с вакциной против кори в развивающихся странах, с компонентами вакцины. «Я до сих пор храню листок бумаги с номером его телефона», — говорит Бенн, которой сейчас уже 50 лет. С того времени она постоянно работает совместно с Ааби. Сегодня она — профессор Университета Южной Дании и руководитель датской части *Bandim Health Project*, автор 200 с лишним работ, посвященных неспецифичности вакцин и роли витамина А в их эффективности. Она считает своим домом Данию, но примерно десять недель в году проводит в Гвинеи-Бисау.

Исследования Ааби и Бенн, относящиеся к вакцине против кори, подтверждают результаты первых наблюдений Ааби. В статье, опубликованной в 1995 г. в *BMJ*, представлен анализ 12 ранее обнародованных данных — в том числе их собственных — о связи вакцинации против кори и смертности в развивающихся странах. Показано, что в суммарном снижении смертности на долю вакцинации приходится 30–86%. Сама корь отвечает за гибель лишь небольшой части невакцинированных детей, то есть вакцина не только предотвращает болезнь, она делает что-то еще. В статье, опубликованной в 2014 г. в *JAMA*, Ааби и Бенн с коллегами исследовали, распространяется ли этот защитный эффект на развитые страны. Они установили, что датские дети, получившие живую вакцину против кори, эпидемического паротита и краснухи (MMR), на 14% реже попадают в больницу в связи с одной из этих инфекций, чем их сверстники, недавно получившие инактивированную вакцину против дифтерии, столбняка, коклюша,

Двойная защита

Иммунная система человека имеет две линии защиты: адаптивную и врожденную. Адаптивная система вырабатывает клетки, которые реагируют только на специфические бактерии или другие чужеродные агенты. Система врожденного иммунитета — оружие мгновенного действия, но ее эффективность в отношении конкретного патогена ограничена. Недавние исследования показывают, что эта система поддается «обучению» с помощью вакцин на основе живых, но ослабленных патогенов, в результате чего она реагирует на несколько патогенов.



полиомиелита и *Haemophilus influenzae* типа B. Эта работа привела к тому, что в 2017 г. Центры по контролю и профилактике заболеваний пришли к следующему выводу: по крайней мере в США живые вакцины оказывают более мощное действие, чем инактивированные.

Лаби и Бенн считают также, что BCG-вакцинация снижает неонатальную смертность. В статье за 2018 г. сообщается, что детская смертность снизилась на 19% после кампании по вакцинации

против полиомиелита (использовалась живая пероральная вакцина, OPV). А клинические испытания, результаты которых были опубликованы в 2013 г., показали, что OPV-вакцинация, проведенная через двое суток после рождения совместно с BCG, уменьшает смертность на 42% по сравнению с одной только BCG-вакцинацией. Опираясь на эти данные, 15 ученых направили в 2016 г. в *Lancet* статью, утверждающую, что переход от живой OPV к IPV (инактивированной вакцине

SOURCES: "TRAINED IMMUNITY: A PROGRAM OF INNATE IMMUNE MEMORY IN HEALTH AND DISEASE," BY MIHAIL C. NETEA ET AL., IN SCIENCE, VOL. 332, APRIL 23, 2010; AND "INNATE IMMUNE MEMORY: A PARADIGM SHIFT IN UNDERSTANDING HOST DEFENSE," BY MIHAIL C. NETEA ET AL., IN NATURE IMMUNOLOGY, VOL. 16, JULY 2015; Illustration by Jan Strömdalen



Новорожденному ребенку вводят вакцину против туберкулеза в одной из больниц Гвинеи-Биссау

против полиомиелита), как это планировалось в рамках Глобальной инициативы по ликвидации полиомиелита (GPEI), может привести к повышению детской смертности.

Ааби и Бенн уверены, что из полученных ими результатов можно сделать только один вывод: вакцины оказывают на организм более глубокое действие, чем считалось ранее. Теперь предстояло выяснить причину феномена.

Усилитель широкого спектра действия

Возможно, ответ на этот вопрос знает Михай Нетеа (Mihai G. Netea), иммунолог из Университета Неймегена им. Св. Радбода Утрехтского, взявшийся за исследование, которое захватило его целиком. Сотрудники его лаборатории занимались изучением влияния *BCG*-вакцины на иммунные клетки человека, а именно — того, каким образом они «обучают» их распознавать и уничтожать бактерию *Mycobacterium tuberculosis*. В рамках одного из тестов они подвергли пробы крови вакцинированных волонтеров действию *Candida albicans*. Согласно общепринятой иммунологической доктрине, состоящей в том, что любая вакцина строго специфична, *BCG* не должна была реагировать на *Candida*.

Через несколько недель студентка, проводившая эксперимент, заявила: «По-видимому, я сделала что-то не так, потому что результаты тестов с одной только туберкулезной палочкой и тестов, где присутствовала *Candida*, различаются». Нетеа подумал, что образцы были чем-то загрязнены, однако тестирование с новыми пробами крови дало такие же результаты. Нетеа был в недоумении и обратился к литературным данным по *BCG*. При тщательном изучении источников обнаружилось, что, по-видимому, вакцина защищает животных от малярии, гриппа и *Listeria monocytogenes*, обычного возбудителя пищевых инфекций.

Каким образом вакцина против туберкулеза изменяет иммунную реакцию, «заставляя» ее отвечать на другие патогены? Полное противоречие с устоявшейся точкой зрения на вакцины! Иммунизация побуждает организм вырабатывать антитела, которые распознают и атакуют специфические белки данного патогена, так что организм при повторной встрече с ним находится в полной боевой готовности. Этот феномен называется адаптивным иммунитетом. Он аналогичен снайперам, которые нацелены на конкретную мишень. Нетеа и подумать не мог, что данный тип иммунитета причастен к способности *BCG* обеспечивать защиту от других патогенов.

Другой тип защиты, относительно которого сложилось мнение, что он не работает при вакцинации, — врожденный иммунитет. Это «воинское подразделение» открывает огонь при появлении любого чужеродного агента, будучи своего рода командой быстрого реагирования. В ответ на проникновение в организм патогена он запускает воспалительную реакцию. Фагоциты, в частности особый их тип — макрофаги, захватывают и уничтожают патогены. Кроме того, они секретируют так называемые цитокины, которые «выводят на сцену» другие клетки иммунной системы. При этом образуются белки, которые «помечают» патогены, облегчая цитокинам выполнение их задачи.

Учитывая все сказанное выше о *BCG*, которая защищает организм от нескольких патогенов, Нетеа предположил, что система врожденного иммунитета причастна к этим особенностям данной вакцины. Но, согласно бытующим представлениям, данная система не может «помнить» о прошлых

контактах организма с патогенами. Она реагирует на любой чужеродный агент, а потом забывает об этом — как солдат, потерявший память в результате контузии. Как оказалось, такое представление ошибочно.

В статье, опубликованной Нетеа с коллегами в журнале *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* в 2012 г., утверждается, что иммунная система человека, получившего BCG-вакцину, вырабатывает в четыре раза больше цитокина IFN-гамма (IFN- γ) и в два раза больше цитокина TNF и интерлейкина-1-бета (IL-1 β) при последующем контакте с другими патогенами. Этот ответ может существовать до трех месяцев после вакцинации, что свидетельствует о способности системы врожденного иммунитета помнить о прошлом. В 2018 г. те же ученые заявили, что BCG-вакцина перепрограммирует иммунные клетки таким образом, что они начинают распознавать возбудителя желтой лихорадки.

По словам Хелен Гудридж (Helen Goodridge), иммунолога из медицинского центра Сидарз-Синай в Лос-Анджелесе, Нетеа «по существу, создал новую область иммунологии». Его теория получила поддержку других лабораторий. Так, показано, что вакцина против кори усиливает иммунный ответ на токсин, вырабатываемый возбудителем столбняка, а также на *Candida*.

Как именно BCG-вакцина расширяет спектр своего действия — неясно, но работы Нетеа наводят на мысль, что она вызывает изменения в клеточном метаболизме и регуляции работы генов, опосредующих работу иммунной системы. Сразу после вакцинации эти гены получают некую «молекулярную метку», которая опосредует их включение немедленно после проникновения в организм другого патогена. Но почему при этом живая вакцина ведет себя активнее, чем инактивированная? Может быть, живые микроорганизмы вызывают другую реакцию просто потому, что они живые? (Реальная инфекция, например корь, не дает таких преимуществ и на самом деле может подавлять иммунный ответ.)

Занимаясь подготовкой к публикации статьи в *PNAS* в 2012 г., Нетеа случайно наткнулся на то, что обнародованные результаты испытаний Ааби и Бенн, из которых следовало, что BCG-вакцинирование приводит к уменьшению неонатальной смертности — феномен, с биологической точки зрения невозможный. В высшей степени заинтригованный, Нетеа написал Ааби, заявив, что тот раскрыл природу механизма, который объясняет его, Нетеа, данные. С тех пор эти два биолога вместе с Бенн работают над исследованием биологической основы последствий иммунизации в Гвинее-Бисау. По-видимому, вакцины «изменяют иммунную систему, но не так, как это происходит в случае адаптивного иммунитета», —

говорит Тобиас Коллман (Tobias Kollmann), иммунолог из Университета Британской Колумбии, который эпизодически сотрудничает с Ааби, Бенн и Нетеа.

Испытание испытаний

Нил Халси (Neal Halsey), бывший директор Института безопасности вакцин при Университете Джонса Хопкинса, соглашается с тем, что Ааби внес неосценимый вклад в иммунологию вакцин, но считает, что открытие неспецифичности их действия — не единственная его заслуга. В 1980-х гг. Ааби первым обратил внимание на небезопасность новой, более концентрированной вакцины против кори, которая применялась в Гвинее-Бисау и других развивающихся странах. Сначала Ааби никто не поверил — и это было ему не впервой; но затем Халси проанализировал данные по Гаити и получил такой же результат. Основываясь на этих фактах, ВОЗ в 1992 г. изъял вакцину из оборота.

Но сегодня Халси считает, что с выводами относительно концентрированной вакцины Ааби поспешил. На Международном конгрессе по вакцинам, состоявшемся в 2018 г. в Вашингтоне, Халси заявил, что фактические данные по Гвинее-Бисау, по-видимому, справедливы, но Ааби и Бенн некорректно их интерпретировали. Дети, получившие вакцину, зачастую отличались от тех, кто не был вакцинирован: их исходное состояние могло быть лучше, а родители более состоятельны, что позволяло им заботиться о своих отпрысках и чаще посещать врачей. По словам Халси, вывод, что вакцинация ответственна за совершенно разные последствия медицинского характера, несостоятелен.

Это иллюстрируют, в частности, данные по Нидерландам, изложенные в одной из публикаций в *BMJ* за 2017 г. Авторы проанализировали информацию о частоте госпитализаций детей, начинающих ходить, которые получили живую вакцину, и сравнили ее с таковой среди тех, кто получил вакцину инактивированную. Обнаружилось, что первые попадали в больницу по поводу различных инфекционных заболеваний на 38% реже, чем вторые, а кроме того частота госпитализаций среди них по поводу различных травм и отравлений была ниже на 16%. Вакцины не могли быть ответственными за снижение этих рисков, что указывает на наличие каких-то других факторов, влияющих на ситуацию. Авторы допускают, что особенности вакцинации в Нидерландах, вероятнее всего, «взвинчивают» действие «безопасной вакцины», как ее называют авторы, и данные по другим странам не могут быть так уж сильно искажены.

Поскольку столь трудно судить о причинно-следственных связях исходя из имеющейся информации, Халси с коллегами посоветовали Ааби и Бенн

провести в большей степени рандомизированные контролируемые испытания — то, что называют «золотым стандартом», — чтобы исключить не имеющие отношения к делу факторы. В рамках таких испытаний детей случайным образом разбивают на две группы — одни получают вакцину, другие плацебо — и следят за состоянием их здоровья длительное время. Это исключает влияние социоэкономического статуса и исходного состояния здоровья испытуемых на последствия вакцинации. Но беда в том, что вакцины уже одобрены к применению по всему земному шару, и незачем просто взять и отбросить полученные по ним результаты. Эту проблему еще предстоит решить.

Организовать клинические испытания в Гвинее-Бисау особенно трудно. Ааби и Бенн вынуждены хранить вакцины в своих домашних холодильниках, подключенных к автономному генератору электроэнергии, поскольку электросети страны часто выходят из строя (при мне это случилось каждый день). Еще одна проблема — нестабильность политической ситуации в стране: одно испытание пришлось прервать по причине разразившейся в 1998 г. гражданской войны. Кроме того, многие жители страны говорят на редких диалектах и с ними трудно общаться.

Но Ааби и Бенн не отчаиваются: они уже проводят рандомизированные испытания, и в одном из них участвует Мария. Результаты некоторых уже завершенных испытаний не совпадают с полученными ранее. Так, в 2018 г. в одном из них обнаружилось, что младенцы, получившие рекомендованную вакцину против кори в возрасте девяти месяцев плюс дополнительную вакцину в возрасте между четырьмя и четырьмя с половиной месяцами, попадают в больницу или умирают не реже, чем те, кому не была сделана вторая прививка. Но два других испытания подтвердили реальность действия вакцины. Халси отдает должное упорству этих двух ученых. «Такие люди всегда признают свои ошибки», — говорит он.

Коллеги по цеху относятся к Ааби и Бенн настороженно по другой причине: в свое время они опубликовали статью, в которой утверждалось, что инактивированные вакцины, например *DTP*, небезопасны, особенно для девочек. Несмотря на то что они защищают организм от тех инфекций, против которых их создавали, Ааби и Бенн считают, что при этом повышается риск других инфекционных заболеваний. Почему это происходит — неясно; возможно, контакт со смертельно опасными патогенами повышает толерантность иммунной системы к другим возбудителям. Критики тандема ученых считают, что подобные предположения не только несостоятельны, но и вредны, поскольку подрывают доверие людей к вакцинам. «Раздаются голоса, что я просто сошел с ума», — сетует Ааби.

В поисках истины

Сегодня борьба Питера Ааби за свою правоту переходит в новую фазу. По его словам, финансовые ресурсы, которые он тратит на свои исследования, вот-вот иссякнут, но появилась иллюзорная надежда на помощь ВОЗ. Впервые Ааби имел дело с этой организацией в 1997 г.; в 2013 г. была создана рабочая группа, которая должна была ознакомиться с его данными. В 2014 г. ВОЗ заявила, что работа заслуживает внимания, а в 2016–2017 гг. обсудила планы ознакомления со следующими испытаниями. Одно из них предполагалось направить на исследование влияния *BCG*-вакцинации сразу после рождения на детскую смертность (с плацебо-контролем), другое — на оценку эффектов от введения добавочной дозы противокоревой вакцины вместе с *DTP* детям в возрасте от 12 до 16 месяцев.

Однако Ааби опасается, что эти испытания мало что прояснят. Пациенты получают инактивированные вакцины или в то же время, что и живые, или после них, что, согласно полученным учеными данным, может затушевать потенциальные положительные эффекты. «Мы обсудили это со многими экспертами и пришли к выводу, что скорее всего испытания, организованные подобным образом, ничего не дадут», — говорит Коллман. Такого же мнения придерживается Шанн, австралийский педиатр. На эти испытания «уйдет огромное количество денег и времени, — заявляет он, — поскольку их организаторы — не специалисты в данной области». Да и когда они начнутся, никто не знает. Представитель ВОЗ Тарик Ясаревич (Tarik Jasarevic) говорит, что на начало 2019 г. у организации не было спонсоров, которые могли бы финансировать испытания.

Ааби обеспокоен тем, что вся помощь ВОЗ сводится к заявлениям о намерении. По его мнению, организация лишь делает вид, что она что-то делает, памятуя о его заявлении в 2014 г. о неспецифичности вакцин, но ее истинная цель — сделать так, чтобы эта тема ушла с повестки дня. Если неспецифические эффекты существуют и могут способствовать спасению многих жизней, то общественные организации, связанные со здравоохранением, должны позаботиться об изменениях в схеме вакцинации и, возможно, заменить некоторые инактивированные вакцины живыми, что, конечно, очень трудно осуществить.

В прошлом году я спросил Фрэнка Де Стефано (Frank DeStefano) из Центров по контролю и профилактике заболеваний, что следует предпринять для реализации таких изменений в США. «Прежде всего мы должны быть уверены, что то, о чем идет речь, — реальность», — ответил он. И добавил, что в настоящее время центры не планируют расширять базу данных по этой тематике. Но даже если дополнительные данные появятся, необходимо оценить все возможные выгоды и риски, прежде чем что-либо менять.

Вечером накануне моего отъезда из Гвинеи-Бисау я сидела с Кристин Бенн в садике за ее домом и размышляла: а что эта пара думает о науке? Они не сомневаются, что неспецифическое действие вакцин существует, но многие детали этого сложного феномена неясны, и Ааби и Бенн не боятся открыто говорить об этом. Оппонентам такое поведение представляется проявлением слабости, а непоколебимая убежденность сказывается на результатах. Может быть и так. Но это относится не только к Ааби и Бенн. Ученые — это люди со своими идеями и суждениями, а каждое исследование предполагает интерпретацию результатов. Кто знает, чья интерпретация ближе к истине? И кому известно, что уверенные в своей правоте предубеждены в большей степени, чем те, кто ни на чем не настаивает? Как определить, достаточно ли собрано данных для того, чтобы быть уверенным в достоверности того или иного феномена, особенно если этот феномен необычен и имеет важные последствия? Ответов на эти вопросы не существует, и особенно это относится к такой области исследований, о которой здесь идет речь.

«Процесс исследования можно сравнить с разматыванием клубка. Вы тянете и тянете нить, но не знаете, каков размер клубка», — говорит Бенн. Она имеет в виду работу по исследованию

вакцин, но все сказанное относится к любому научному исследованию. Биология — чрезвычайно сложная наука, потому что сложны объекты ее изучения. Если вакцины действительно таковы, как считают Ааби и Бенн (а этот вопрос остается открытым), нам предстоит еще многое прояснить, прежде чем мы поймем, как они работают. ■

Перевод: Н.Н. Шафрановская

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Vaccine Programmes Must Consider Their Effect on General Resistance. Peter Aaby et al. in *BMJ*, Vol. 344, Article No. e3769. Опубликовано онлайн 14.06.2012.
- The Introduction of Diphtheria-Tetanus-Pertussis and Oral Polio Vaccine among Young Infants in an Urban African Community: A Natural Experiment. Søren Wengel Mogensen et al. in *EBiomedicine*, Vol. 17, pages 192–198; March 2017.
- Trained Immunity: An Ancient Way of Remembering. Mihai G. Netea and Jos W.M. van der Meer in *Cell Host & Microbe*, Vol. 21, No. 3, pages 297–300; March 8, 2017.
- BCG Vaccination Protects against Experimental Viral Infection in Humans through the Induction of Cytokines Associated with Trained Immunity. Rob J.W. Arts et al. in *Cell Host & Microbe*, Vol. 23, No. 1, pages 89–100; January 10, 2018.

Выходит 6 раз в год

Познавательный журнал для хороших людей

«Дмитрий Иванович, пора заняться работой» — так академик Н. Н. Зинин с афористической краткостью выразил настороженное отношение к Д. И. Менделееву многих представителей российского химического сообщества

В раковых клетках, поврежденных химиотерапией, активируются «спящие» гены, помогающие опухоли выжить и приобрести устойчивость к лекарствам

Каждые несколько лет под вулканом Стромболи формируется новый магматический канал взамен «старого» — это приводит к необычно мощным извержениям

Клеточные белки, ищущие повреждения в ДНК, оптимизируют и комбинируют механизмы поиска, чтобы находить «мишень» за наименьшее время и без потерь энергии

Вопреки мифу, русская водка приобрела сорокаградусную крепость не благодаря Д. И. Менделееву, а законодательно — для компенсации выдыхания «крепкого вина» при хранении и транспортировке

www.scfh.ru



ВСЕ ДАННЫЕ МИРА В ОДНОМ ЯЙЦЕ

Как можно использовать
молекулу ДНК для
хранения и генерирования
гигантских объемов
информации

Джеймс Далман

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- ДНК обладает множеством свойств, благодаря которым она идеально подходит для хранения не только генетического кода, но и любой другой информации. В настоящее время ДНК пока неспособна заменить обычные электронные накопители, например жесткие диски.
- Однако по мере совершенствования методов секвенирования специалисты в таких областях, как химическая инженерия, начинают использовать ДНК в качестве молекулярного записывающего устройства, которое позволяет генерировать данные с невиданной ранее скоростью.
- Таким образом, ДНК используется не только для «чтения», но и для «записи» информации. Это поразительное научное достижение способно в значительной степени ускорить разработку лекарств и создание новых методов терапии.

ОБ АВТОРЕ

Джеймс Далман (James E. Dahlman) — научный сотрудник Отделения биомедицинской инженерии им. Уоллеса Коултера в Технологическом институте Джорджии и Университета Эмори. Его лаборатория ведет исследования в следующих областях: транспорт лекарственных веществ в ткани организма, нанотехнологии, геномика и редактирование генома.



несколько миллиардов лет тому назад, задолго до того момента, как человек создал жесткий диск, на гребне эволюции возникла молекула ДНК, способная хранить самую, пожалуй, ценную информацию — генетический код. ДНК настолько хорошо справилась с этой задачей, что теперь она присутствует во всех известных живых организмах, населяющих Землю. Благодаря современным технологическим достижениям, которые позволяют нам легко «читать» ДНК и даже «записывать» в нее информацию, человечество научилось использовать эту древнюю молекулу для хранения вообще любой информации, которую в эпоху больших данных человечество с нарастающей скоростью создает и накапливает.

В настоящее время специалисты широко обсуждают вопрос о перепрофилировании ДНК. Они хотят, чтобы эта молекула уместила в себя всю накопленную человечеством информацию точно так же, как она хранит в себе генетический код. В конце концов, современные запоминающие устройства, на которых информация представлена, как известно, в виде двоичного кода, уже работают на пределе возможностей. Вот, например, недавно возникла следующая проблема, затронувшая вопрос о безопасном хранении данных: социальная сеть *Myspace* (некогда самая популярная) объявила о том, что все персональные данные пользователей, накопленные за десять лет, могут быть безвозвратно потеряны в ходе переноса серверов. Вся уязвимость и отсталость существующих технологий хранения информации отчетливо проявляется при решении задачи долгосрочной защиты данных (например, в ходе перезагрузки веб-сайта после перерыва в работе). Таким образом, перед нами возникает вопрос: где хранить всю нашу информацию? Кроме того, хранение данных подразумевает еще и значительные энергозатраты.

Преодолеть все эти трудности нам помогут свойства ДНК. Во-первых, структура двойной спирали

этой молекулы идеально подходит для хранения информации, поскольку (по правилу комплементарности) если мы знаем последовательность нуклеотидов одной нити ДНК, то автоматически можем определить последовательность другой нити. Кроме того, ДНК способна сохранять свою стабильность на протяжении очень-очень долгого времени, а это означает гарантию целостности и точности представления информации, заключенной в этой молекуле. Например, в 2017 г. ученые подробно исследовали ДНК, выделенную из человеческих останков, возраст которых составил 8,1 тыс. лет. Заметим, что все это время они хранились отнюдь не в идеальных условиях. Таким образом, при хранении в холодной и сухой среде молекула ДНК с большой долей вероятности способна сохранять свои свойства на протяжении десятков тысяч лет. Итак, ДНК способна сохранять свою стабильность на протяжении весьма долгого времени, а это означает гарантию целостности и точности представления информации, заключенной в этой молекуле.

Но, возможно, самое поразительное свойство двойной спирали заключается в том, что она умеет компактно складываться, образуя тем самым

очень плотную структуру. Так, каждая отдельная клетка человека содержит ядро диаметром примерно 0,00001 м. Если бы ДНК, извлеченную из ядра, вытянули в длину, то она бы достигла 2 м. Кроме того, если все молекулы ДНК человека связать вместе и вытянуть в одну линию, то ее общая длина достигла 100 трлн м. В 2014 г. ученые подсчитали, что в одном грамме ДНК можно хранить 455 эксабайт информации. Такая плотность хранения данных примерно в миллион раз выше, чем у жестких дисков.

Итак, молекула ДНК — это, по сути, потенциальное средство хранения информации. Однако прежде чем она заменит традиционные жесткие диски, нам предстоит решить множество не только научных, но и экономических задач, к тому же учесть и этические вопросы. Между тем благодаря своим достоинствам ДНК быстро становится одной из самых востребованных форм информационных технологий. Например, ученые уже смогли приспособить эту молекулу в качестве носителя, на который были записаны старые голливудские фильмы, — они теперь хранятся не на хрупкой микропленке, а прямо в генетическом коде. А совсем недавно ДНК стали использовать в качестве инструмента для разработки более безопасных методов генной терапии и противоопухолевых препаратов, а также для создания, возможно, первого в истории человечества средства, позволяющего вести непрерывный скрининг состояния живого организма. В этой передовой области технологий возникают и другие идеи: скажем, молекуле ДНК уготована роль не только долгосрочного хранилища информации — ее можно использовать еще и для формирования данных. И она способна делать это с невиданной ранее скоростью. И все потому, что в отличие от других молекул ДНК более эластична, что позволяет нам в значительной мере наращивать объемы данных, сократив при этом затраты на их хранение.

Увеличиваем количество наночастиц

В последние годы ученые все чаще используют ДНК в качестве молекулярного регистратора, предназначенного для наблюдения за экспериментом и анализа его результатов. При этом во многих случаях специалисты стали применять так называемое ДНК-штрихкодирование: чтобы отследить результаты отдельного эксперимента и их проанализировать, ученые используют заранее известную последовательность ДНК в качестве молекулярного маркера. Например, с результатом эксперимента номер один связана нуклеотидная последовательность АСТАТС, с результатом эксперимента номер два — ТСТГАТ и т.д.

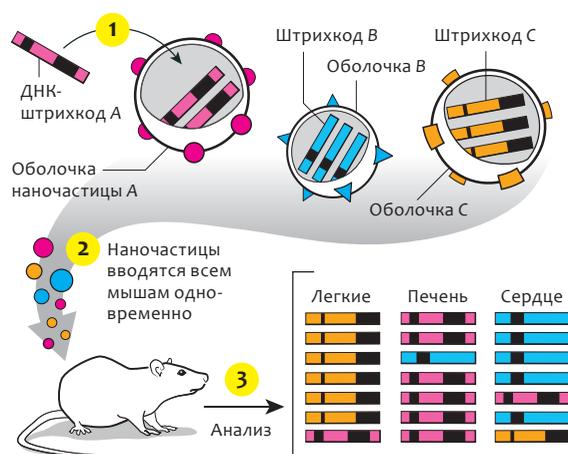
ДНК-штрихкодирование появилось в начале 1990-х гг. Его предложили в качестве способа наблюдения за химическими реакциями Ричард

Лернер (Richard Lerner) и ныне покойный Сидни Бреннер (Sydney Brenner), работавшие тогда в Научно-исследовательском институте Скриппса. Идея была новаторской, но она опередила свое время: ведь на тот момент еще не были разработаны технологии, позволяющие легко и без значительных финансовых затрат считать ДНК. Потенциал ДНК-штрихкодирования реализовали только после того, как было сделано множество открытий в таких областях, как химия нуклеотидов и микрогидродинамика, — все вместе они привели к созданию передовых методов секвенирования. Крупный прорыв произошел в 2005 г., когда в рамках одного из экспериментов, длившегося четыре часа, ученым удалось прочесть 25 млн пар нуклеотидов ДНК.

Передовые методы секвенирования быстро совершенствуются; теперь нам вполне по силам с легкостью прочитать одновременно миллионы последовательностей нуклеотидов ДНК, а это значит, что мы можем провести одновременно

Отслеживание наночастиц по ДНК-штрихкоду

ДНК-штрихкодирование позволяет ученым эффективно тестировать наночастицы, предназначенные для доставки лекарственных препаратов к различным тканям организма. Раньше данный процесс был трудоемким и занимал много времени. Однако теперь появилась возможность тестировать одновременно сотни частиц различного типа. Во время тестирования уникальный ДНК-штрихкод помещают под оболочки наночастиц разных видов **1**. Эти наночастицы предназначены для доставки лекарственных средств напрямую в поврежденные клетки. В процессе экспериментальной проверки ученые вводят одновременно большое количество наночастиц **2**. Затем проводится сканирование клеток на предмет выявления типа наночастиц, попадающих в ткани организма **3**. Эта процедура позволяет быстро определить оптимальную конструкцию наночастицы, способной с заданной точностью доставлять препараты в пораженные ткани и при этом минимизировать побочные эффекты.



SOURCE: "A DIRECT COMPARISON OF IN VITRO AND IN VIVO NUCLEIC ACID DELIVERY MEDIATED BY HUNDREDS OF NANOPARTICLES REVEALS A WEAK CORRELATION," BY VALERIA PALONCHUK ET AL., IN NANO LETTERS, VOL. 13, NO. 3, MARCH 14, 2014; ILLUSTRATION BY JEN CHRISTENSEN

несколько тысяч экспериментов и проанализировать их результаты. Анализ экспериментов с применением ДНК-штрихкодирования и современных методов секвенирования — это одна из форм управления данными: вместо того чтобы проверять по одной гипотезе за раз, ученые теперь могут составлять, скажем, по 20 тыс. прогнозов и проверять их все сразу с целью выявления правильных.

Первыми широко использовать ДНК-штрихкодирование стали биологи. По мере роста доступности этой технологии ее стали все чаще применять для проведения экспериментов и в других научных областях, включая химическую технологию и материаловедение. Например, в моей лаборатории в Технологическом институте Джорджии инженеры используют ДНК-штрихкодирование для совершенствования конструкции и функций наночастиц, предназначенных для безопасной доставки препаратов к поврежденным клеткам. Кто-то, наверное, скажет, что описанная нами нанотехнология, опирающаяся в основном на инструментарий физики и химической технологии, не имеет никакого отношения к ДНК. Но, как бы то ни было, именно с помощью ДНК удалось анализировать и хранить данные любого вида, вот почему эту молекулу выгодно использовать как инструмент организации данных.

Специалисты-нанотехнологи зачастую сталкиваются со следующей непростой задачей: эксперимент, призванный найти эффективные методы лечения, куда проще планировать, чем проводить и анализировать его результаты. Это происходит по той причине, что характеристики каждой из наночастиц — форма, размер, заряд, химический состав — обуславливают способность наночастицы доставлять генетические препараты в поврежденные клетки. Кроме того, перечисленные факторы друг с другом еще и взаимодействуют, из-за чего трудно предсказать, какая из наночастиц точнее всех доставит препарат прямо в цель. Значит, приходится отслеживать каждую наночастицу в отдельности! И, как нас уверяют разработчики наночастиц, создаваемых для препаратов на основе РНК (а это крупные фармацевтические компании), для проведения столь утомительного тестирования необходимы гигантские инвестиции в сотни миллионов долларов.

Вот тут-то молекула ДНК и может проявить себя во всей своей красе — в смысле ее способности хранить информацию. Теперь мы получили



Благодаря двойной спирали ДНК превращается в идеальный инструмент, с помощью которого можно хранить информацию. Но ДНК еще не способна прийти на смену традиционным жестким дискам.

возможность увеличить количество наночастиц, подлежащих тестированию; для этого надо создать несколько тысяч таких наночастиц, наделив их различными химическими свойствами (скажем, сделав их в виде больших положительно заряженных сфер или маленьких треугольников, обладающих нейтральным зарядом) и снабдив каждую такую наночастицу своим уникальным ДНК-штрихкодом.

В итоге получаем, например, следующую картину: наночастица номер один, обладающая химической структурой номер один, несет ДНК-штрихкод номер один; наночастица номер два, обладающая химической структурой под номером два, снабжена ДНК-штрихкодом номер два. Процесс штрихкодирования мы повторяем многократно, создавая тем самым множество различных наночастиц, у каждой из которых свой уникальный молекулярный ДНК-маркер. Затем мы вводим сотни таких наночастиц в поврежденные клетки; и, наконец, для того чтобы определить ту самую наночастицу, которая точнее всех доставила препарат в цель, мы используем секвенирование ДНК для выявления штрихкодов внутри клеток.

Размах, с которым проводятся подобные эксперименты, — явление для наномедицины совершенно новое. Обычно в моей области исследований при проведении экспериментов традиционными методами можно было довольствоваться только наблюдением за пятью наночастицами. К концу 2019 г. моя лаборатория уже надеется выяснить,

как ведут себя 500 различных наночастиц, как они осуществляют генную терапию в отношении 40 различных видов клеток, а это эквивалентно проведению одновременно 20 тыс. экспериментов.

В результате мы должны были разработать аналитические способы контроля качества данных; кроме того, при проверке полученных результатов статистическими методами нам потребовалась помощь. В первую очередь нам удалось определить, насколько качественно результаты одного из экспериментов предсказывают доставку препаратов к поврежденным тканям в другом эксперименте. Убедившись в надежности больших наборов данных, мы перешли к статистическим методам; наша цель заключалась в том, чтобы понять, как влияют некоторые признаки наночастиц (скажем, размеры) на доставку к тканям-мишеням. Мы установили, что качество доставки наночастиц обусловлено не их размером, а химическим составом. С помощью ДНК-штрихкодирования мы надеемся в ближайшем будущем предложить безопасную и менее затратную генную терапию. Одна из задач состоит в том, чтобы создать такие наночастицы, которые бы обеспечили специфическую генную терапию и при этом могли бы эффективнее бороться с раковой опухолью; одновременно с этим мы хотим снизить побочные эффекты, такие как тошнота и выпадение волос, сопутствующие традиционным методам лечения онкологических заболеваний.

И здесь нам удалось достичь некоторых успехов. В 2018 г., опираясь на достаточно большой массив данных, полученных в ходе экспериментов с применением ДНК-штрихкодирования, мы быстро выявили новые наночастицы, обеспечивающие генную терапию эндотелиальных клеток, которыми выстланы кровеносные сосуды, а также несколько видов иммунных клеток, управляющих иммунным ответом человеческого организма. Это открытие поможет изменить подходы к методам лечения — теперь появляется возможность регулирования активности белков в иммунных клетках, которые в настоящее время не поддаются медикаментозному лечению (заметим, что белки малочувствительны к воздействию низкомолекулярных лекарственных веществ или антител). К нашим разработкам проявили интерес специалисты в области генной терапии, о чем свидетельствуют работы, опубликованные в 2018 и 2019 гг. в таких научных изданиях, как *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, *Advanced Materials* и *Journal of the American Chemical Society*. Кроме того, мы создали компанию *GuideRx*, специализирующуюся на ДНК-штрихкодировании; главная задача компании — разработка методов безопасной генной терапии.

К настоящему моменту ДНК-штрихкодирование стало явлением настолько распространенным, что появились различные его модификации даже

в пределах одной области исследований. Один из примеров — онкобиология; ее задача — выяснить, каким образом генетические мутации вызывают рак, и создать новые фармакологические средства против онкологических заболеваний. Попутно заметим, что в настоящее время серьезную проблему представляет собой устойчивость к лекарственным препаратам: поначалу организм пациента зачастую хорошо реагирует на лекарство, но потом положительное воздействие лекарственных средств снижается, поскольку они теряют способность уничтожать раковые клетки.

Чтобы разобраться в причинах подобной резистентности к лекарственным средствам, ученые из лаборатории Тодда Голуба (Todd Golub) при Гарвардском университете воспользовались ДНК-штрихкодированием. В 2016 г. они с помощью вируса вставили ДНК-штрихкод непосредственно в геном раковых клеток. При этом раковой клетке вида *A* соответствовала штрихкод-последовательность *A*; раковой клетке вида *B* — штрихкод *B* и т.д. Ученые смешали разные виды клеток, поместили их в чашку Петри и обработали противоопухолевым препаратом.

Если препарат разрушает раковую клетку или замедляет ее рост, то клетка перестает делиться. И наоборот, если клетка приобретает устойчивость к лекарству (резистентность), то она быстро делится. Следовательно, со временем относительное количество штрихкодовых меток вида *A* увеличивается, если клетки вида *A* становятся невосприимчивы к лекарству. И, наоборот, число последовательностей вида *A* уменьшается, если лекарство уничтожает эти клетки. После секвенирования всех штрихкодов, взятых из выживших клеток, лаборатория количественно оценила, насколько эффективно все виды клеток одновременно реагировали на препарат.

В конце того же года лаборатория Монте Уинслоу (Monte Winslow) при Стэнфордском университете использовала клеточные линии поджелудочной железы, помеченные ДНК-штрихкодом, для идентификации лекарств, способных предотвращать распространение раковых клеток (метастазирование). С помощью вируса ученые внедрились штрихкод во все клеточные линии, а затем поместили каждую клеточную линию в предназначенную для нее лунку. Затем все лунки были обработаны противораковым препаратом. Таким образом, препарат под номером один стал ассоциироваться со штрихкодом номер один. Сразу после этого ученые вводили клетки в кровь, а затем определяли, какие из них смогли проникнуть в легкие. Затем, идентифицируя штрихкоды (выявив максимальное их количество или их отсутствие), ученые смогли определить те препараты, которые способствовали метастазированию или же, наоборот, его предотвращали.

В третьем эксперименте ученые из Института Броуда при Массачусетском технологическом институте и Гарвардском университете воспользовались ДНК-штрихкодированием, чтобы выяснить, каким образом гены данного конкретного генома реагируют на определенный вид рака. Сначала ученые вырастили очень большую колонию клеток, которую затем поместили в большую чашку Петри. После этого с помощью генного редактирования все гены данного генома один за другим включали или, наоборот, выключали. Последовательность нуклеотидов данного гена, экспрессия которого была изменена, служила в качестве штрихкода. Затем клетки обрабатывали противораковым препаратом и секвенировали ДНК. Это позволило ученым разобраться в том, каким образом каждый ген данного генома влияет на устойчивость к лекарственным средствам.

При использовании этих методов ДНК действует одновременно и как молекула, генерирующая данные (поскольку эксперименты требуется проводить все одновременно), и как молекула, способная эти данные хранить (поскольку передовые методы секвенирования используются для анализа ДНК-штрихкодов). Выводы обнадеживают: одни и те же методы могут использоваться по отношению к аутоиммунным, неврологическим и сердечно-сосудистым заболеваниям. ДНК-штрихкодирование оказалось очень мощным инструментом; чтобы в этом убедиться, поставьте вместо слова «рак» название любого другого заболевания, а вместо «резистентность» — любую другую реакцию на лекарственное средство, которую ожидает получить исследователь. Таким образом, метод ДНК-штрихкодирования позволяет уже на ранних стадиях значительно упростить разработку лекарств, тем самым ускоряя поиск эффективных методов лечения.

«Читать» vs «писать»

В основе ДНК-штрихкодирования лежат методы «чтения» определенных последовательностей ДНК. Однако до недавнего времени мы практически не умели генерировать эти последовательности, то есть «записывать» их. Вообще говоря,

«записывать» ДНК, по моему мнению, означает целенаправленно преобразовывать один вид информации (например, рисунки, фильмы или биологические состояния) в последовательности, которые можно накапливать, чтобы затем их считывать. В основе многих из таких новых технологий записывания лежат методы редактирования генов, которые, в свою очередь, базируются на *CRISPR* (от англ. *clustered regularly interspaced short palindromic repeats* — «короткие палиндромные повторы, регулярно расположенные группами»). Теперь с помощью *CRISPR*, спроектированных определенным образом, ученые научились синтезировать последовательности ДНК.

Некоторые современные достижения науки появились лишь после того, как ученые воспользовались *CRISPR* — механизмом, который в процессе эволюции появился у бактерий и предназначался для защиты от вирусных атак. Остановимся на нем подробнее: когда вирус атакует бактерию, он сначала прикрепляется к ее поверхности, а затем внедряет в клетку бактерии вирусную молекулу ДНК или РНК. В свою очередь, бактерии, чтобы «запомнить» вирус и тем самым предотвратить последующие вирусные атаки, создали механизм *CRISPR*, назначение которого — опознавать вирусную ДНК или РНК, а затем вставлять небольшие фрагменты вирусной ДНК в свой бактериальный геном. Другими словами, бактерия, чтобы себя обезопасить, как бы «записывает» в досье характеристики каждого вируса, который на нее напал.

И вот Сет Шипман (Seth Shipman) из Калифорнийского университета в Сан-Франциско (ранее он работал в лаборатории гарвардского генетика Джорджа Черча) воспользовался методом *CRISPR* и записал изображение человеческой руки прямо в геноме кишечной палочки (*Escherichia coli*). Для этого группа под руководством Шипмана впервые выделила два белка: *Cas1* и *Cas2*. Каждый из них способен захватывать нуклеотид ДНК и вставлять его в геном. Затем исследователи «вмонтировали» в ДНК кишечной палочки последовательности нуклеотидов, кодирующих пиксели, из которых (при секвенировании) и было создано изображение руки. Для этой цели ученым

В отличие от обычных накопительных устройств ДНК может сохраняться десятки тысяч лет, если, конечно, хранить ее в прохладных и сухих условиях. Кроме того, молекула ДНК выдерживает условия экстремальной жары, которую обычные электронные устройства выдержать не могут

пришлось сопоставить определенному массиву информации некоторые части молекулы ДНК. Скажем, нуклеотидные звенья А, С, G и T соответствуют определенным цветовым пикселям, в то время как штрихкод-последовательность ДНК отвечает за пространственное расположение данного пикселя в целом изображении.

После этого исследователи провели обратную операцию: после секвенирования ДНК из кишечной палочки (*E. coli*) ученые воспроизвели исходное изображение с точностью, превышавшей 90%. После этого они повторили эксперимент, производя существенное изменение его условий: они добавляли ДНК в разные моменты времени, а затем с помощью некоторого метода выявляли местоположение записанных последовательностей ДНК друг относительно друга. Затем ученые определили, когда именно (то есть в какой момент времени) данный фрагмент был добавлен в геном *E. coli*, и после этого им удалось создать серию изображений, кодирующих фильм. Ученые записали файл в графическом формате (*GIF*), на котором был запечатлен отрывок из знаменитой серии фотографий Эдварда Мейбриджа, созданных в 1878 г., «Лошадь в движении». В одной из работ, опубликованных в 2017 г., было заявлено о том, что с помощью секвенирования бактериального генома удалось воссоздать знаменитые фото Мейбриджа.

А совсем недавно ученые из лаборатории Рэндалла Платта (Randall Platt) при Швейцарской высшей технической школе Цюриха сделали одно очень важное открытие, которое развивает описанные выше подходы: авторы нацелились на мРНК, которая приходится молекуле ДНК, так сказать, одной из двоюродных молекулярных сестер и имеет для нее большое значение. Вместо записи изображений, кодируемых искусственно созданными последовательностями ДНК, ученые воспользовались механизмом *CRISPR*, порожденным различными видами бактерий, и стали напрямую записывать экспрессию генов естественной мРНК бактерий. Множество всех различных мРНК, генерируемых в клетке, отвечает за выработку белков и, следовательно, предопределяет все клеточные функции.

Чтобы записать мРНК, продуцируемую клеткой в разные моменты времени, ученые из лаборатории Платта сначала отсортировали белки типа *CRISPR-Cas*, полученные из множества различных бактериальных штаммов. Этот процесс позволил выявить белки, способные синтезировать цепь ДНК на обычной мРНК, трансформируя ее в геном. Ученые обнаружили, что эту операцию могут прodelывать белки *Cas1* и *Cas2*, находящиеся в бактерии *Fusicatenibacter saccharivorans*. В 2018 г. в ходе серии блестяще поставленных экспериментов с использованием специализированных вирусов исследовательская группа из лаборатории Платта продемонстрировала, что клетки способны хорошо

запоминать такие внешние факторы, как воздействие окислительного стресса, кислотной среды или даже гербицида.

Полученные результаты впечатляют, поскольку они продемонстрировали следующее: гены, полученные в ходе естественной экспрессии клетки в некоторый момент времени, можно записывать прямо в геном для последующего их анализа. Лаборатория Платта продолжает совершенствовать описанную выше технологию, поэтому увеличивается вероятность того, что процесс записи информации на клеточном уровне станет обычным явлением. И, может быть, данная технология наконец даст ученым возможность понять, каким образом клетка становится раковой, как она реагирует на инфекцию не только на небольших временных промежутках, но также с увеличением возраста человека.

ДНК в роли жесткого диска?

Молекулу ДНК используют теперь в самых разных областях (и число их возрастает) для генерирования, записи и хранения информации. Возникает логичный вопрос: сможет ли ДНК успешно конкурировать с традиционными устройствами хранения данных и, в конечном итоге, обеспечит ли эта молекула сохранность всей информации, накапливаемой человечеством? К сожалению, придется дать отрицательный ответ: на сегодня жесткие диски и флеш-накопители гораздо лучше приспособлены к хранению информации, чем даже самые передовые системы, создаваемые на основе ДНК.

Но у традиционных электронных устройств, как и у любого технического средства, имеются свои ограничения. Например, для них необходимо выделять физическое пространство, они требуют особой внешней среды. Кроме того, даже самые долговечные из них вряд ли проработают более нескольких десятилетий. Таким образом, принимая все это во внимание, мы вскоре обнаружим, что всю информацию, накопленную человечеством к настоящему моменту, традиционным устройствам сохранить будет крайне трудно.

В отличие от обычных накопительных устройств ДНК может сохраняться десятки тысяч лет, если, конечно, хранить ее в прохладных и сухих условиях. В лабораторных условиях, где можно создавать экстремальные температуры, ДНК обычно хранят при температурах -20 и даже -80°C . Кроме того, молекула ДНК выдерживает условия экстремальной жары, которую обычные электронные устройства выдержать не могут. В 2015 г. ученые из Швейцарской высшей технической школы Цюриха Роберт Грасс (Robert Grass) и Венделин Старк (Wendelin Stark) продемонстрировали, что ДНК, заключенная в оболочку из двуокиси кремния, способна выдерживать температуру до $+70^{\circ}\text{C}$ в течение недели и при этом в молекуле не происходит

никаких изменений. К настоящему времени уже созданы жесткие диски, способные вмещать до одного терабита на квадратный дюйм, но, согласно некоторым оценкам, оказалось, что всю информацию, порожденную человечеством к настоящему моменту, в принципе можно заключить в ДНК весом 1 кг.

Для того чтобы хранение информации в молекуле ДНК стало обычным явлением, необходимо решить сложнейшие технические задачи. Главное препятствие заключается в том, что хранение информации и ее извлечение — не одно и то же. Скажем, считывание данных с привычного жесткого диска осуществляется практически мгновенно, в то время как их извлечение из ДНК требует секвенирования — а на эту операцию в настоящее время уходит от нескольких минут до целого дня. Несмотря на тот факт, что за последние несколько лет мощность секвенаторов увеличилась, они по сравнению с привычным жестким диском выглядят громоздкими и дорогими.

И это еще не все проблемы, которые необходимо решить, прежде чем методы хранения информации с помощью ДНК действительно покажут всю свою мощь. Кроме того, наше общество обязано признать, что из-за доступности секвенирования ДНК отследить любого человека будет намного проще; к тому же возникнут новые угрозы для безопасности данных. И это не считая того факта, что в США и в других странах мира уже и так имеются проблемы с утечкой информации.

Секвенирование ДНК уже используется в отделениях полиции США, причем какого-то мощного контроля над этой процедурой не заметно. Стражи закона заставляют арестованных (даже тех, кто совершил незначительное преступление) сдавать тест на ДНК, после чего вся эта информация перетекает в большие банки генетических данных. Кое-кто утверждает, что сдачу персональной ДНК можно приравнять к своего рода дактилоскопии XXI в. Однако, согласитесь, разница между отпечатками пальцев и личной ДНК слишком велика. Отпечатки пальцев идентифицируют лишь одного человека; другое дело — ДНК: если ее предоставит кто-то из ваших родственников, то тем самым он распространит информацию, которая имеет отношение к любому члену вашей семьи, включая вас. В Китае под видом внедрения программы здравоохранения были собраны генетические данные почти у 36 млн человек. В эту группу вошли и многие уйгуры — представители мусульманской этнической группы, которая подвергается дискриминации. При этом никто не знает, как именно правительство распорядится полученными данными.

В настоящее время опасения насчет хранения информации в молекуле ДНК связаны с доступностью генетического кода человека; в результате дискуссия стала вращаться вокруг вопроса

о защите прав личности. Однако если другие виды цифровых данных (например, информация из медицинских учреждений, информация о заключенных контрактах, персональные цифровые архивы) действительно будут храниться в ДНК, то возникнет еще больше вопросов по поводу уязвимости информации, хранимой в этой молекуле, — причем с точки зрения как физической защиты устройства, так и кибербезопасности. А поскольку в столь крошечном пространстве, как ДНК, можно хранить гигантские объемы информации, то возникает вопрос: каким образом нужно распределить данные, чтобы избежать их высокой концентрации в одном-единственном месте? И даже если мы упростим процесс извлечения информации из ДНК, все равно всплывет другой вопрос: как с технической точки зрения осуществлять регулярное обращение к данным, заключенным в молекуле ДНК, и одновременно не допустить их взлома или случайной потери?

Нам еще только предстоит найти ответы на довольно трудные вопросы, причем не только научные, но и этические. А это, увы, энтузиазма не прибавляет. Вот тогда я мысленно обращаюсь к примеру братьев Райт — о них я вспоминаю потому, что сам вырос в том же городе, расположенном в штате Огайо, где и они. Как известно, первый полет братьев Райт длился всего 12 с, а его дальность составила 37 м. Но уже через 66 лет человек без всякой помощи компьютеров высадился на Луну. Вспоминая об этих великих свершениях, я проникаюсь оптимизмом и верю, что мы тоже через несколько десятилетий поставим себе на службу силы, таящиеся в ДНК. Не спорю, эта молекула может создать нам новые проблемы. Но пользы от нее будет гораздо больше. ■

Перевод: И.В. Ногаев

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Next-Generation Digital Information Storage in DNA. George M. Church et al. in *Science*, Vol. 337, page 1628; September 28, 2012.
- High-Throughput In Vivo Screen of Functional mRNA Delivery Identifies Nanoparticles for Endothelial Cell Gene Editing. Cory D. Sago et al. in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 115, No. 42, pages E9944-E9952; October 16, 2018.
- Transcriptional Recording by CRISPR Spacer Acquisition from RNA. Florian Schmidt et al. in *Nature*, Vol. 562, pages 380–385; October 18, 2018.
- Tech Turns to Biology as Data Storage Needs Explode. Prachi Patel; *ScientificAmerican.com*, опубликовано онлайн 31.05.2016.

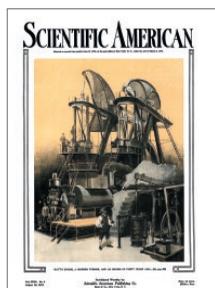


АВГУСТ 1969

Дрейфующие гены. «Естественный отбор — основа эволюции. Однако в этот процесс вмешивается другой тип изменений, настолько независимых от естественного отбора, что они могут даже способствовать преобладанию генов, которые препятствуют адаптации,

а не помогают ей. Этот процесс, называемый генетическим дрейфом, — случайная статистическая флуктуация в частоте гена, когда он передается от популяции одного поколения к популяции следующего. Мы с коллегами 15 лет исследовали генетический дрейф у жителей долины Пармы в Италии. Мы изучали книги церковных приходов, записи о регистрации брака в архивах Ватикана, анализировали группы крови, разрабатывали математические теории и, наконец, провели компьютерное моделирование одного из регионов. Генетический дрейф может значительно влиять на эволюцию». — Луиджи Лука Кавалли-Сфорца (Luigi Luca Cavalli-Sforza).

Дрейфующие континенты. Приведены новые доказательства концепции континентального дрейфа. Вальтер Шпролл (Walter Sproll) и Роберт Диц (Robert S. Dietz) из Атлантических океанографических лабораторий Управления служб наук об окружающей среде сообщают, что им удалось показать: Антарктида и Австралия, сейчас отделенные друг от друга 3,2 тыс км океана, были когда-то одним континентом. Сосредоточив внимание на изобате глубиной 1 тыс. морских саженей, которая, как они полагают, представляет собой истинные границы каждого из континентов, они загрузили данные в компьютер Университета Майами до тех пор, пока не получили максимально точное совпадение.



АВГУСТ 1919

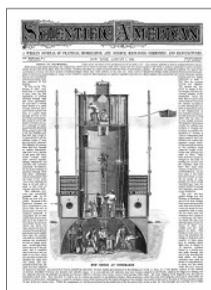
Воздушная почта.

Эксперимент по доставке почты на паром в море будет предпринят Сайрусом Циммерманом (Cyrus Johnson Zimmerman), опытным пилотом, который

последует за пароходом «Адриатика» через два-три часа после того, как тот отправится в Англию, и, обогнав его, сбросит мешок с почтой в море впереди по его курсу. За экспериментом будут пристально следить руководства почтового ведомства и пароходной компании.



Мертвая вода. Морьякам, часто посещающим побережье Перу, особенно бухту Кальяо, хорошо знакомо любопытное явление, известное как «маляр». Вода обесцвечивается и источает тошнотворный запах, очевидно, из-за высокого содержания сероводорода. Суда покрываются тinou шоколадного цвета. В статье, представленной Географическому обществу Лимы, Хосе Антонио де Лавалли-и-Гарсиа (Jose Antonio de Lavalle y Garcia) приходит к выводу, что основная причина этого — сезонное смещение течений, когда теплый экваториальный противоток вытесняет холодное перуанское течение. Из-за изменения температуры океана погибает много планктона; распад этой органической массы приводит к наблюдаемому явлению.



АВГУСТ 1869

Солнечное горнило. Материалы, из которых состоит Солнце, способны производить больше тепла в пересчете на килограмм, чем любые вещества, которыми мы пользуемся для этих целей. Недавние исследования в области химии расскажут о более простом состоянии материи

звезд и туманностей, чем те, с которыми мы знакомы на Земле. Кто знает еще что-нибудь помимо того, что производство земных элементов сопровождается излучением света и тепла, по интенсивности аналогичным тому, что мы сегодня наблюдаем на Солнце и звездах? Эта теория подтверждается благодаря постоянно увеличивающемуся количеству фактов, которые предоставляет спектроскоп.

Угольная экономика. Все согласны с тем, что цены на уголь абсурдно высоки; но не все согласятся в отношении причины этого или в отношении того, каким образом их можно снизить. Стронники свободной торговли говорят, что высота цен связана с таможенным тарифом, а некоторые

протекционисты утверждают, что это происходит из-за чрезмерно высоких тарифов на перевозку и зарплаты, запрашиваемой шахтерами. По нашему мнению, это комбинация всех перечисленных причин. Нам требуются дополнительные конкурентоспособные транспортные линии с крупных месторождений угля к основным торговым центрам и дополнительная рабочая сила. ■

Доставка почты самолетом-амфибией на движущийся пароход, 1919 г.

БИОЛОГИЯ

Неуязвимые клетки- ки

Биологи близки к созданию организма, способного противостоять любому существующему на Земле вирусу. На очереди могут быть неуязвимые клетки человека

Роуэн Джейкобсен



ОБ АВТОРЕ

Роуэн Джейкобсен (Rowan Jacobsen) — журналист; его предыдущая статья в нашем журнале, «Цветы-призраки» (ВМН, № 4, 2019), рассказывает о воскрешении генов умерших растений.



В

ирусную частицу, присоединяющуюся к клетке, можно уподобить пауку, который «приземляется» на воздушный шарик, превышающий его по размерам в тысячу раз. Ее «тельце» с шестью тонкими растопыренными «ножками» напоминает шприц с округлой головкой. Хищника зовут «фаг лямбда», а его жертва — бактерия *Escherichia coli*. Обнаружив цель, фаг поступает так же, как поступало бесчисленное число вирусов со времен зарождения жизни: он прикрепляется «ножками» к клеточной мембране и впрыскивает внутрь клетки свою ДНК.

Эта молекула содержит в закодированном виде всю информацию, необходимую для сборки новых вирусных частиц, но у самого вируса нет для этого собственного молекулярного механизма. Зато он умеет использовать в своих целях «оборудование» клетки-хозяина и успешно размножается в ней до тех пор, пока она не лопнет под напором массы вирусных частиц. Универсальность такого механизма объясняется тем, что все живые организмы — от носорогов, обитающих в Африке, до риновирусов, поселяющихся у нас в носоглотке и вызывающих насморк, — используют одну и ту же систему кодирования, хранилищем которой выступает молекула ДНК (в некоторых случаях — РНК).

Обычно за несколько минут инфицированная клетка наполняется новыми вирусными частицами и «трещит по швам». Высвободившиеся частицы находят следующую жертву — и весь цикл повторяется снова и снова.

Но что если клеточную машину «застопорит» и она попросту не сможет считывать инструкции,

закодированные в вирусной ДНК? В кажущихся нерушимыми взаимоотношениях вирусов с бактериями такого раньше не случалось. Если это произойдет — фагу λ конец.

Переформатирование взаимоотношений возможно, если перепрограммировать *E. coli* таким образом, чтобы ее операционная система начала работать способом, не существовавшим ранее на Земле, и генетический код вируса стал несовместимым с таковым бактерии. Фаг λ окажется в положении вируса, предназначенного для *Windows* и попавшего в *Mac*. Такая же судьба постигнет любой вирус, атакующий модифицированную клетку. Тот, кто ее создает, заявляет, что она «получит прививку» от всех на свете вирусов. Клетку назвали *rE.coli-57*; считается, что у нее большое будущее.

Клетку *rE.coli-57* конструирует в Гарвардской медицинской школе группа биологов, которую возглавляет молодая исследовательница Нили Остров (Nili Ostrov). Последние пять лет она была с головой погружена в разработку деталей генетической реконструкции бактерий. Ее исследование

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Атаки вирусов на клетки приносят фармакоиндустрии, которая получает лекарственные вещества с помощью бактерий, и другим отраслям промышленности миллиардные убытки. Кроме того, они представляют угрозу здоровью человека.
- Перекодирование ДНК бактерий делает их нечувствительными к вирусам.
- Модифицированные бактериальные клетки должны нормально функционировать, что откроет путь к созданию нечувствительных к вирусам клеток человека.

проводится в рамках самого продвинутого проекта по редактированию генома и отражено в статье в *Science* за 2016 г., где указано 148 955 изменений в молекуле ДНК, которые необходимы для превращения ее в неподвластную вирусу молекулу. Остров с коллегами реализовали 63% из них.

Через три года уникальная клетка будет практически создана. И скоро в чашке Петри ее попробует атаковать не один фаг λ , а сотни других вирусов. Если *rE.coli-57* выживет, это навсегда изменит взаимоотношения вирусов и их жертв — в том числе и нас с вами.

Вирусы вездесущи и многолики; на каждом квадратном метре земной поверхности их примерно 800 млн. Они выступают возбудителями болезней человека и животных, заражают культуры бактерий, используемых для получения йогурта и производства лекарственных веществ. Биотехнологический гигант *Genzyme* (сегодня он входит в состав *Sanofi*), который получает лекарственные средства микробиологическими способами, потерял половину рынка после того, как в 2009 г. на его фармацевтической фабрике в Олстоне, штат Массачусетс, произошло вирусное заражение бактериальных культур. Вирусы наносят колоссальный ущерб пищевой промышленности, где бактерии используются для ферментации сыра и йогурта, — эти продукты приходится выбрасывать, если бактерии оказываются загрязненными вирусами. Устойчивая к ним бактерия — «денежный мешок» с миллионом долларов.

С ее появлением открываются новые перспективы в медицине. «Если мы хотим создавать антитела и белковые лекарственные белки с необычными свойствами, нам необходимо будет придать исходным молекулам другие химические свойства, — говорит Остров. — Для фармацевтических компаний это аналогично изменению правил игры». Все природные белки построены из 20 аминокислот, одинаковых для разных белков, но у *rE.coli-57* изменена операционная система, благодаря чему она может синтезировать новые белки, используя экзотические аминокислоты, — точно так же, как добавление новых кусочков *LEGO* расширяет возможности создания более пространственных конструкций с использованием в качестве основы исходного набора фрагментов. Создатели новых белков смогут нацеливать их на устранение конкретных болезней, например СПИДа или рака, и делать это с беспрецедентной точностью.

Другая, гораздо более трудная задача — получение клеток человека, защищенных от вирусов. Это стало бы неоценимым подспорьем для ученых-медиков: им очень мешает в их работе заражение вирусами клеточных линий, на которых проводится тестирование терапевтических средств. Скептики, однако, сомневаются в том, что такие видоизмененные клетки будут в функциональном

отношении идентичны обычным. Беспокоит и тот факт, что подобные манипуляции приблизят нас еще на один шаг к созданию человеческих существ с искусственной ДНК. (Разумеется, ни один из участников проекта не собирается заниматься конструированием новой разновидности *Homo sapiens*.) Не следует забывать также, что перекодирование всего одной клетки человека в лабораторных условиях — чрезвычайно сложная задача, поскольку наш геном состоит из 3,2 млрд букв, что в 800 раз больше, чем у *E. coli*. И создание *rE.coli-57* — это лишь первый, хотя и очень важный, требующий громадных умственных усилий, шаг.

Взломщики кодов

Перекодирование обезоруживает вирусных захватчиков, поскольку изменяет язык, который использует клетка для синтеза белков, строительных «кирпичиков» всего живого. Белки состоят из более мелких «кирпичиков» — аминокислот. Каждой из них соответствует своя трехбуквенная комбинация из азотистых оснований А, С, G и T, состав-

Перекодированные клетки создают основу для получения новых лекарственных веществ. «Фигурально выражаясь, в фармакологии изменятся правила игры», — говорит Нили Остров

ляющих молекулу ДНК. Так, TGG отвечает триптофану, САА — глутамину и т.д. Каждая такая комбинация называется кодоном, а ДНК — это просто их линейная цепочка.

Сборка белков происходит на клеточных фабриках — рибосомах; вначале кодоны образуют пары с молекулами, называемыми транспортными РНК (тРНК). Каждая из них связывается одним своим концом со специфическим кодоном, а другим — с аминокислотой, которая этому кодону соответствует. По мере перемещения последовательности кодонов по сборочному конвейеру белков молекулы тРНК соединяют друг с другом соответствующие аминокислоты — и так до образования белковой молекулы.

Но у этой системы есть одна важная особенность: она вырождена. Число кодонов равно 64 — именно столько трехбуквенных комбинаций может образоваться из А, С, G и T. Аминокислот же всего 20. Это означает, что для большинства из них существует более одного кодона. Так, аргинину

Вирус против клетки

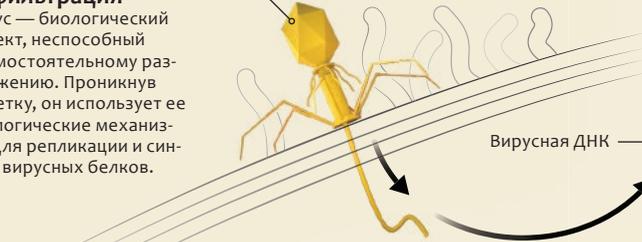
В мире существуют миллионы вирусов, которые инфицируют человеческие и бактериальные клетки, заставляя их работать на себя. Биологи близки к созданию новой версии

кишечной палочки под названием *E.coli-57*, чьи гены функционируют как у обычной бактерии, но делают ее нечувствительной к вирусам.

1 Инfiltrация

Вирус — биологический объект, неспособный к самостоятельному размножению. Проникнув в клетку, он использует ее биологические механизмы для репликации и синтеза вирусных белков.

Вирус



Вирусная ДНК

Вирусная мРНК

Вирусная частица прикрепляется к наружной стенке бактерии и впрыскивает внутрь свою ДНК. Последняя состоит из тех же «букв», что и бактериальная ДНК, то есть эти молекулы совместимы друг с другом.

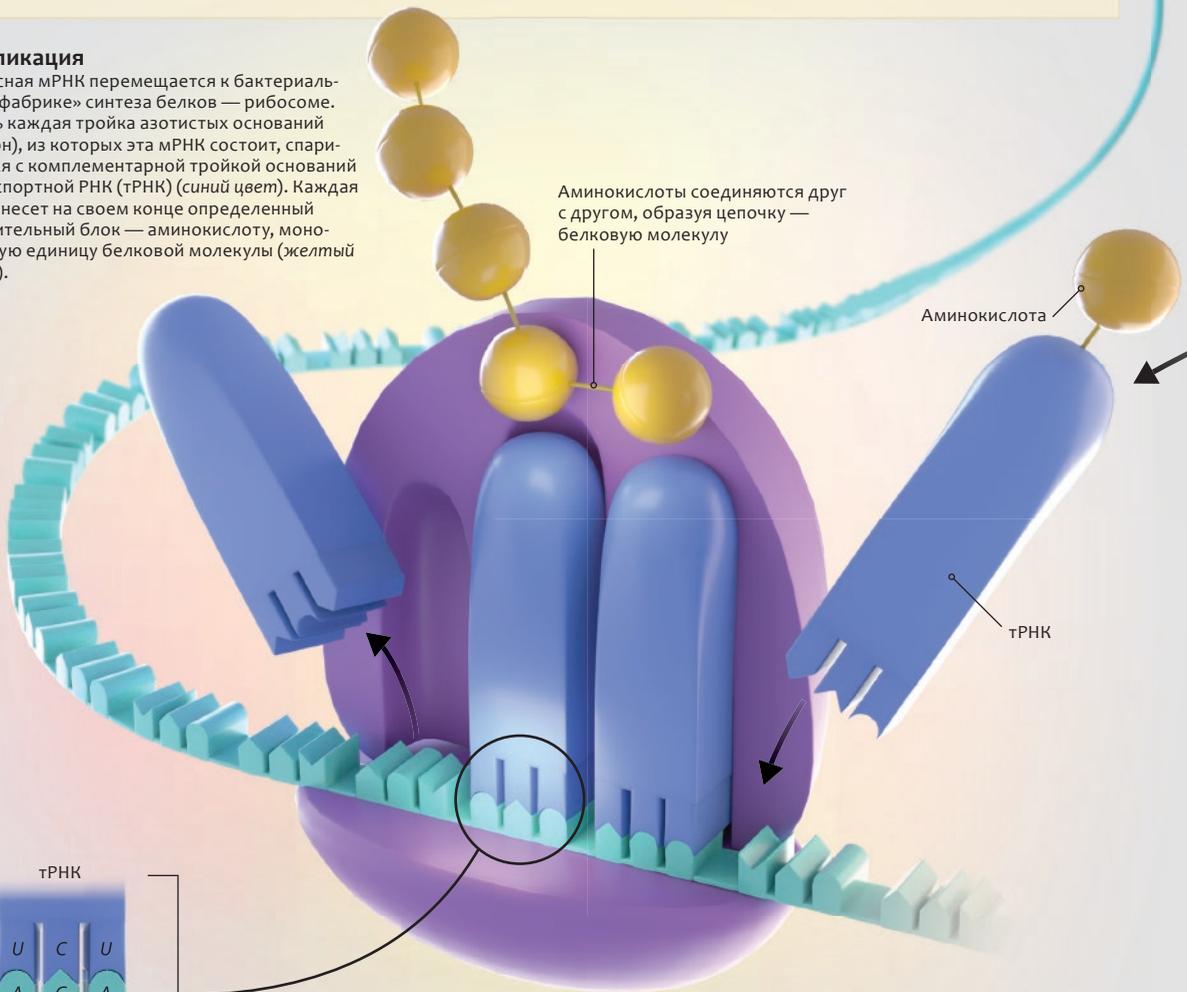
Вирусная ДНК транскрибируется с образованием матричной РНК (мРНК), содержащей инструкции для синтеза вирусных белков

2 Репликация

Вирусная мРНК перемещается к бактериальной «фабрике» синтеза белков — рибосоме. Здесь каждая тройка азотистых оснований (кодон), из которых эта мРНК состоит, спаривается с комплементарной тройкой оснований транспортной РНК (тРНК) (синий цвет). Каждая тРНК несет на своем конце определенный строительный блок — аминокислоту, мономерную единицу белковой молекулы (желтый цвет).

Аминокислоты соединяются друг с другом, образуя цепочку — белковую молекулу

Аминокислота



тРНК



мРНК-кодон

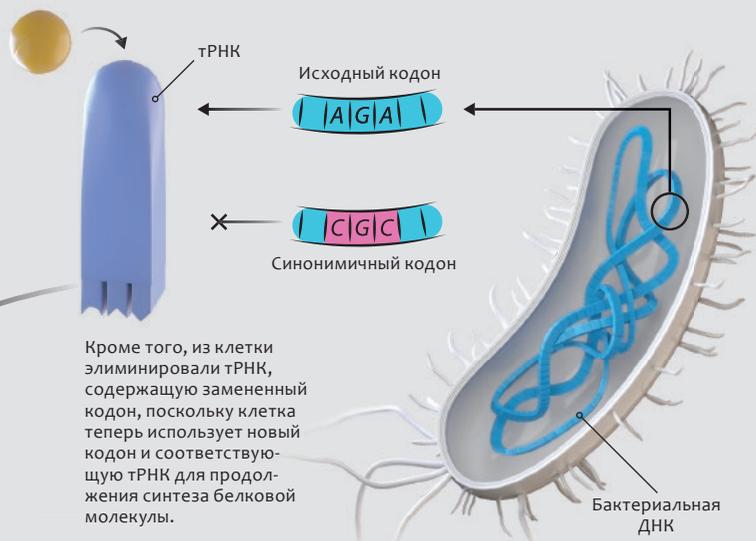
3 Взрыв

Внутри бактериальной клетки происходит самосборка вирусных частиц из вирусных ДНК и белков. Когда этих частиц становится много, клетка не выдерживает их напора и лопаается. Вирусные частицы выходят наружу и инфицируют другие клетки.



4 Несовместимая с вирусом ДНК

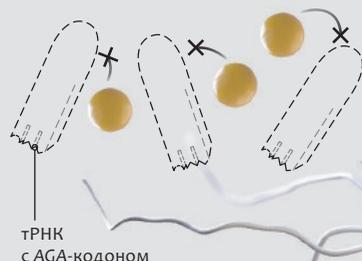
Для того чтобы заблокировать репликацию вируса, биологи перекодировали клеточный геном. Они заменили отдельные кодоны (светло-синий цвет) синонимичными кодонами (розовый цвет), которые состоят из других букв, но кодируют ту же аминокислоту. Таким образом, клетка по-прежнему синтезирует все необходимые ей белки.



Кроме того, из клетки элиминировали тРНК, содержащую замененный кодон, поскольку клетка теперь использует новый кодон и соответствующую тРНК для продолжения синтеза белковой молекулы.

5 Блокирование репликации

Вирусные ДНК и мРНК по-прежнему могут использовать только исходный кодон. Однако соответствующей тРНК в клетке больше нет и синтез вирусного белка блокируется. Сборка вирусных частиц невозможна — клетка спасена.



соответствуют два из них — AGG и CGA. У некоторых аминокислот целых шесть кодонов.

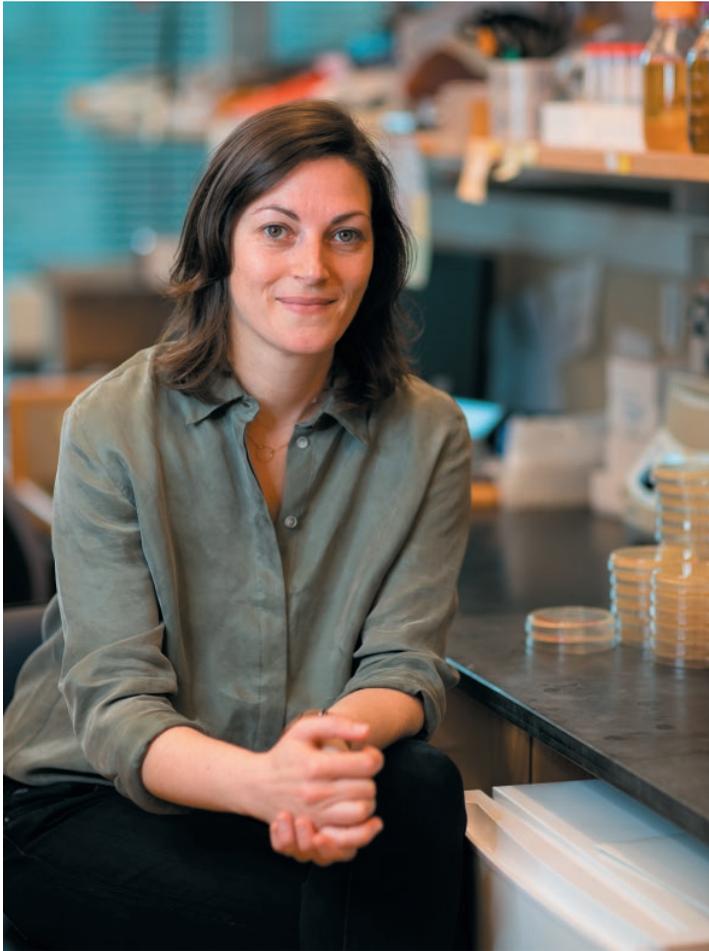
В 2004 г. Джордж Черч (George Church), генетик из Гарвардского университета и научный руководитель Остров, решил выяснить, все ли эти кодоны действительно необходимы. Что произойдет, если каждый AGG-кодон в геноме *E. coli* заменить на CGA? Поскольку оба они кодируют аргинин, бактерия должна синтезировать нормальный белок. Однако — и это очень важный момент — если тРНК, которая связывается с кодоном AGG, тоже элиминировать, то мы придем к AGG-тупику в синтезе белка.

Задумавшись над тем, к чему приведет устранение из клетки определенных тРНК, Черч пришел к выводу: «Я осознал, что клетка станет нечувствительной ко всем вирусам и получит небывалые преимущества». Обычно вирус, например фаг λ, проникнув в клетку, «заставляет» последнюю считывать информацию со своих генов и синтезировать вирусные белки. Но если AGG-тРНК из клетки удалена, то каждый вирусный ген, содержащий этот кодон, будет напрасно ожидать прибытия соответствующей тРНК и синтез соответствующих вирусных белков не завершится.

Вирусы эволюционируют очень быстро, и Черч полагал, что они вскоре научатся обходиться без какой-то одной элиминированной тРНК. Но если устранить слишком много кодонов и тРНК, вирус не сможет спонтанно «выйти» на правильную комбинацию мутаций, позволяющую получить модифицированный код. У *E. coli* имеется семь относительно редких кодонов. Они присутствуют во всех 3548 ее генах, в среднем 17 раз на ген. Если элиминировать все соответствующие тРНК, вирусу придется создать примерно 60 тыс. новых нуклеотидных фрагментов, каждый из которых должен заменить «вытесненный» кодон в нужном месте. И это еще не все.

В 2004 г. подобный сценарий представлялся совершенно нереальным. Было чрезвычайно трудно заменить в геноме даже единственный ген; а редактирование тысячи генов для устранения каждого экземпляра целевого кодона было исключено. Но к 2014 г. прогресс в биотехнологии достиг такого уровня, что непредставимое стало казаться возможным. И тогда Черч предпринял поиски мотивированного человека, обладающего к тому же организаторскими способностями, который взялся бы за организацию самого грандиозного в истории проекта по редактированию генома.

Как раз в это время Остров поступила в его лабораторию в качестве научного сотрудника.



Биолог Нили Остров с коллегами из Гарвардского университета близки к созданию бактерии *rE.coli-57*, идентичной *E. coli* за исключением того, что в ее геноме заменены 150 тыс. азотистых оснований. Такие замены сделали ее нечувствительной к вирусам.

Если Черч был архитектором *rE.coli-57*, то Остров, обладающая большим опытом в области молекулярного конструирования, стала инженером и генеральным менеджером. Она выросла в Израиле и посещала Тель-Авивский университет, где сумела получить модифицированный белок, присоединив к его молекуле несколько аминокислот, связывающих частичку некоего металла. Несколько таких молекул, соединившись друг с другом, образовали нанопроводник, способный пропускать электрический ток. «Это было здорово, — вспоминает Остров. — Я подумала: с помощью биологии мы можем делать полезные вещи!» Позже, уже в Колумбийском университете, она получила докторскую степень за работу по созданию пекарских дрожжей, которые начинали вырабатывать красный пигмент, как только обнаруживали болезнетворные микроорганизмы. Работа была удостоена премии *Grand Challenge Exploration*, учрежденной Фондом Билла и Мелинды Гейтс, за возможность обнаружения возбудителя холеры.

Резюме Остров впечатляло, но проект Черча был несоизмеримо сложнее. Семь кодонов, которые надлежало элиминировать, встречались в *E. coli* 62 214 раз. Для перекодирования их всех в ДНК нужно было внести 148 955 изменений. В печати было множество сообщений о быстром и несложном редактировании генов, но ни один из инструментов не годился для внесения такого огромного числа изменений.

Помог в решении проблемы прорыв в технологии синтеза ДНК: получение перекодированного генома *E. coli* из фрагментов. ДНК можно создавать биохимическими методами с помощью так называемого ДНК-принтера, аналогичного обычному принтеру, но печатающего «буквы» А, С, G и T. Сегодня ДНК-синтезирующие компании без труда получают фрагменты ДНК длиной до 4 тыс. букв.

В 2015 г. Остров с коллегами загрузила в компьютер геном обычной *E. coli*, длинную цепочку из 4 млн букв, взятую из базы данных, и заменила все 62 214 позиции семи редких кодонов на синонимы. (Для подстраховки были изменены также соответствующие гены, чтобы бактерии нуждались в синтетической аминокислоте, внесенной в питательную среду. Эта аминокислота не существовала в природе, так что бактерия, вышедшая из стен лаборатории, погибла бы.) В результате всех манипуляций был получен геном новой бактерии, *rE.coli-57* — строка занимала весь экран компьютера. Затем его разбили на отрезки длиной в 4 тыс. букв с перекрывающимися концами и переслали файлы ДНК-синтезирующей компании. Ее сотрудники напечатали ДНК и отправили результат заказчику. Остров к коллегами собрали из буквенных кусочков 87 крупных фрагментов по 50 тыс. букв каждый, что примерно соответствовало 40 генам.

Данные фрагменты, конечно, представляли собой части ДНК, а у ДНК имелся свой код. Клетке предстояло «оживить» его, но никто не знал, как собрать полноценную ДНК из имевшегося материала. Остров пошла другим путем. Она начала с колоний обычной *E. coli* и постепенно, один за другим, заменяла каждый кусочек ее генома перекодированным фрагментом, проверяя каждый раз, жив «пациент» или скорее мертв.

Перестраивание клетки

На длинных полках в лаборатории Черча помимо центрифуг, вихревых смесителей, штативов с пипетками и стопок чашек Петри находится огромный термостат, где Остров с коллегами культивируют 87 колоний обычных *E. coli*, в геном каждой из которых встроен перекодированный фрагмент

длиной в 50 тыс. букв. Остров не очень надеялась на успех. Возможно, эволюция отобрала кодоны по принципу, недоступному нашему пониманию.

Как ни странно, большинство колоний успешно выросли. Всего 20 из числа подвергшихся реверсии фрагментов стали препятствием к росту колоний. Но 20 — это слишком много. Для того чтобы *rE.coli-57* была резистентна к вирусам, должны функционировать все перекодированные фрагменты. «Мы попытались сузить диапазон, — вспоминает Остров, — и разбили 40-генный сегмент на два 20-генных, чтобы посмотреть, что произойдет. Затем дошли до четырех генов, потом до одного. И так выяснили, в каком кодоне дело».

Как оказалось, основная часть вины лежит на ошибках при печати ДНК: нуклеотидная последовательность, полученная группой Остров, не совсем совпадала с той, которую хотели получить, — до недавнего времени это была обычная ситуация при синтезе ДНК *in vitro*. Остров обратилась к ДНК-синтезирующей компании и получила последовательности, не содержащие никаких ошибок. Теперь функционировали более 99% перекодированных генов. Идея оказалась вовсе не сумасшедшей.

Но оставались проблемы, связанные не с ошибками в работе принтера, а с функционированием синтезированных белков или ДНК. Нужно было выяснить, что утаивает от нас эволюция. Почему замена данного кодона на синонимичный наносит ущерб организму или даже приводит к его гибели?

Поиск решения этой проблемы можно уподобить прокладыванию пути в пустыне в отсутствие карты. Например, скорость амплификации бактерии с перекодированным фрагментом уменьшается в 21 раз. Почему? Никакой литературы по поведению перекодированной ДНК не существует; Остров с коллегами были первопроходцами. Они тщательно проанализировали имеющуюся информацию об эффективности всех генов данного фрагмента, сравнив их продукты с таковыми нормальной бактерии, и идентифицировали пять сцепленных интактных генов, не функционирующих по неизвестной причине.

По-видимому, была какая-то проблема с генетической эквивалентностью переключателя. Всем генам в молекуле ДНК предшествует так называемый промотор, который опосредует их включение и выключение. У высших животных промоторы и гены имеют четкие границы — точки начала и конца, но некоторые бактериальные гены перекрываются: последовательность на конце одного гена удваивается при переходе к соседнему. Остров обнаружила, что *uceD*-сегмент в некоем гене выполняет еще и функцию промотора — переключателя для пяти следующих за ним генов. Перекодировав *uceD*, она ненамеренно выключила их. Остров изменила три кодона в этом сегменте так, чтобы их

последовательности были ближе по своему дизайну к одному из известных мощных промоторов. Эффективность этих пяти генов повысилась, и бактерия стала реплицироваться нормально.

Остров с коллегами предстояло разобраться с еще более серьезным вызовом, связанным с перекодированием фрагмента 44, которое приводило к гибели всей колонии. Исследователи сузили проблемный диапазон до одного гена — *accD*, опосредующего синтез жирных кислот. Перекодированная клетка не синтезировала ни одного *accD*-белка. Остров проанализировала структуру перекодированного гена и высказала предположение, что виной всему — самое начало его нуклеотидной последовательности. В норме азотистые основания молекулы ДНК образуют пары АТ и ГС. (В молекуле мРНК, служащей матрицей для синтеза белков на рибосомах, вместо Т используется U, которое тоже связывается с Т.) Если эти основания располагаются на конце молекулы в специфическом порядке — вслед за цепочкой из А идет цепочка из Т, — то конец может замкнуться сам на себя, подобно липкой ленте, и заблокировать машину трансляции. Остров воспроизвела на компьютере такой ген, заменив десять из 15 перекодированных кодонов синонимичными, как она полагала, с меньшей вероятностью образующими петлю. Встраивание модифицированного сегмента в молекулу бактериальной ДНК возвращало колонию к жизни.

Действуя подобным образом — постепенно, шаг за шагом, — Остров с коллегами работали поремесленно, но мыслили как инженеры-механики, следуя заранее выстроенному плану. Это не имело ничего общего со взломом. «До сих пор ничего криминального мы не совершали, — говорит Остров. — Генетический код предоставляет достаточно большое пространство для маневра».

Обезоруживание вируса

Добавив работающие генетические сегменты одного штамма к работающим сегментам другого, Остров получила из исходных 87 штаммов восемь жизнеспособных линий с ДНК длиной в одну восьмую полностью перекодированного генома. Каждое присоединение сегментов порождало новую несовместимость, которую требовалось устранить. В конце концов восемь линий свели к четырем, а затем к двум. Недалеко то время, когда будет получен один штамм с полностью перекодированным геномом, а именно — *rE.coli-57*.

Следующим, финальным шагом станет элиминация тРНК, транспортирующая отсутствующие кодоны, а клетки будут использовать синонимичные кодоны. И тогда для вируса, проникшего в клетку, настанут трудные времена. Не будучи перекодированным, он вынужден будет использовать те же кодоны, что и прежде, а для этого ему понадобится тРНК, которой в клетке больше нет. А раз нет тРНК,

то не будет и аминокислоты для продолжения синтеза белковой молекулы; весь процесс трансляции застынет. Никаких новых вирусных белков, никаких новых вирусных частиц. Вирусная ДНК останется в клетке, но без «подсобных рабочих», обеспечивавших репликацию.

Остров намеревается протестировать этот сценарий в форме микроверсии старого фильма «Безумный Макс 3: под куполом грома», где один из героев, оказавшись в замкнутом пространстве, должен отбиться от нападающих на него монстров. Замкнутым пространством в данном случае будет служить небольшой стеклянный контейнер, попросту чашка Петри с бактериями *rE.coli-57*. В культуральную среду добавляют фаг λ , с которым бактерии начнут бороться не на жизнь, а на смерть. Если *rE.coli-57* выживет, в среду добавят другой фаг, затем, при необходимости, третий. Трудно представить, каким образом даже самый агрессивный фаг сможет расправиться с перекодированной *rE.coli-57*. Но повторим еще раз: никто этого не проведет.

Остров тоже затрудняется с ответом, поскольку пока не получила ни одного полностью перекодированного штамма, но полагает, что цель близка. «Это произойдет скорее раньше, чем позже, — говорит она. — Я ни секунды не сомневаюсь».

Невосприимчивость *rE.coli-57* к вирусам уже делает эту бактерию героем дня, но она способна на больше, о чем Остров с коллегами написала в статье, опубликованной в *Science*. Это уникальный микроорганизм с расширенной синтетической функциональностью, что найдет применение в биотехнологии. Другими словами, мы получим гибкую систему сборки белков совершенно нового типа.

Очень ценная ее особенность — возможность получения уникальных лекарственных веществ. Многие медикаменты, применяемые для борьбы с онкологическими и иммунологическими заболеваниями, — это белки; они быстро разрушаются в организме, а включение в них экзотических аминокислот может существенно увеличить время их жизни. Черч уже запустил проект под названием *GRO Biosciences* (сокращение от *genomically recoded organism*, «генетически перепрограммированный организм»), нацеленный на создание таких препаратов.

Другая жизнь

На горизонте уже вырисовываются преимущества, которые сулит перекодирование клеток с получением устойчивых к вирусам форм. Они позволят решить проблему загрязнения вирусами культивируемых линий человеческих клеток. Такие линии повсеместно используются при тестировании новых лекарственных препаратов. Если хотя бы один вирус попадет в культуральную среду, все пойдет насмарку и тестирование придется

начинать сначала. А между тем чем быстрее будет одобрен новый препарат, тем больше жизней он спасет. Для Центра по развитию инженерной биологии, соучредителем которого выступает Черч, перекодирование клеток человека — конечная цель. Бактерия *rE.coli-57* должна стать одним из средств ее достижения.

Разумеется, у идеи реконструкции операционной системы человека немало оппонентов. Во-первых, перекодированные клетки могут функционально отличаться от исходных. И хотя исследователи даже не помышляют о том, чтобы манипулировать ими вне стен лаборатории, в принципе не исключена возможность создания человеческого существа, тоже невосприимчивого к вирусам.

«Это имело бы непредсказуемые последствия, — говорит вирусолог из Колумбийского университета Винсент Раканиелло (Vincent Racaniello), который подверг инновацию резкой критике. — Вырожденность кода зачем-то нужна. Помимо всего прочего, она служит преградой на пути возникновения летальных мутаций. Перекодирование генома человека не может не давать побочных эффектов».

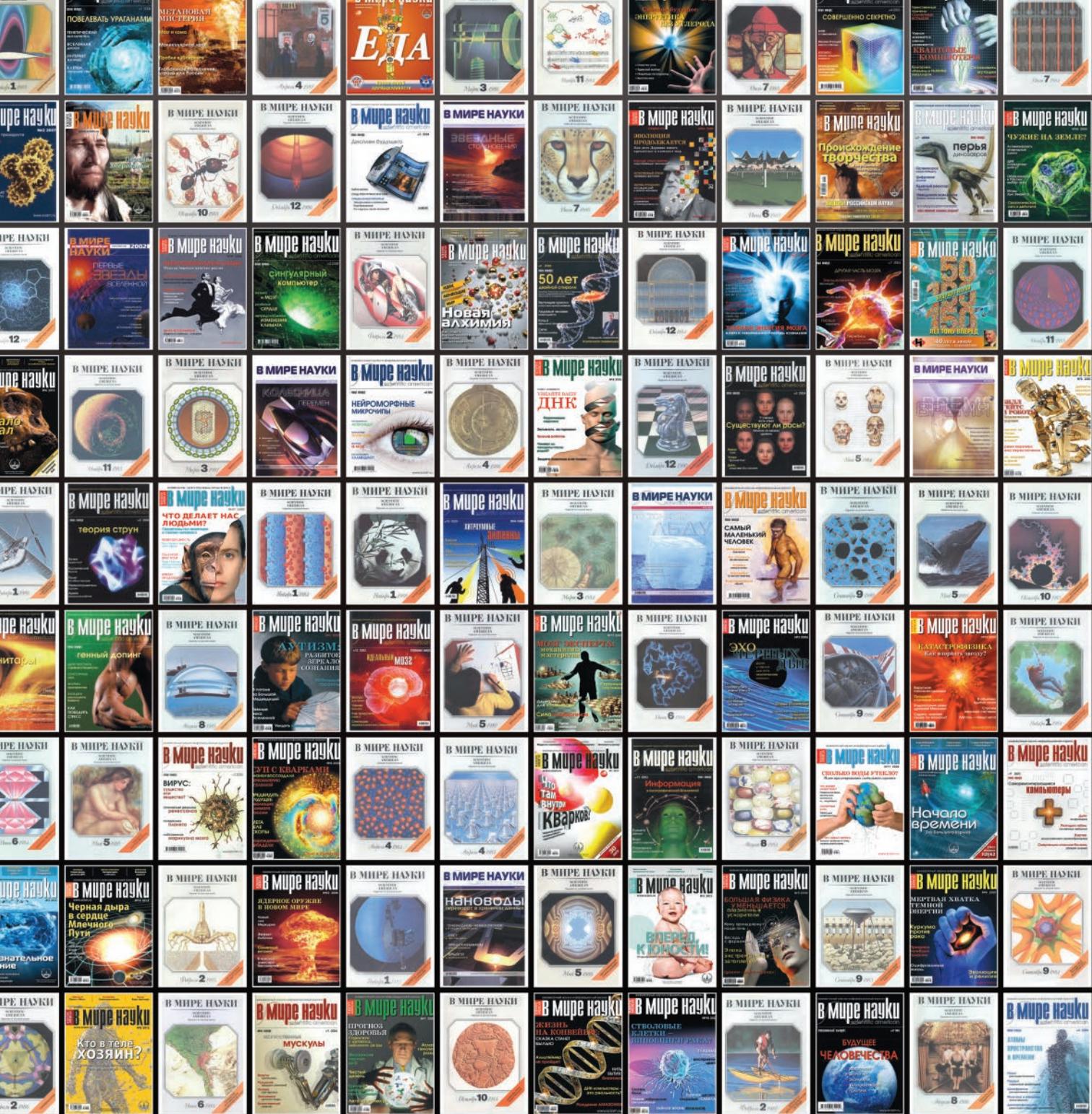
Что если тщательно продуманный, прозрачный эксперимент по изучению поведения перекодированных клеток человека выявит возможность существования совершенно новых взаимоотношений человека с возбудителями наиболее опасных инфекционных заболеваний? Все время нашего существования на Земле мы имели дело с 64-кодонной системой — и болезнетворные вирусы пользовались этим. Возможно, через несколько лет мы узнаем, сохранится ли такое положение дел в будущем.

Остров — не участник проекта Центра по развитию инженерной биологии. «Я не перекодирую клетки человека, — говорит она. — И я считаю, что все эксперименты должны проводиться с неукоснительным соблюдением мер безопасности, в чашке Петри. По какой-то причине эволюция отобразила ограниченное число кодонов. Изменяя их, мы должны проследить все последствия, определить, какие из новых кодонов работают, а какие ни на что не годятся». Это дает нам шанс на улучшение тех организмов, которые могут использовать модифицированные кодоны. ■

Перевод: Н.Н. Шафрановская

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Бейкер Д. и др. Биофабрики будущего // *ВМН*, № 9, 2006.
- Design, Synthesis, and Testing toward a 57-Codon Genome. Nili Ostrov et al. in *Science*, Vol. 353, pages 819–822; August 19, 2016.
- Beyond Editing to Writing Large Genomes. Raj Chari and George M. Church in *Nature Reviews Genetics*, Vol. 18, pages 749–760; December 2017.



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



СПЕЦИАЛЬНЫЙ РЕПОРТАЖ

ОДИН МАЛЕН



БЖИЙ ШАГ



▲ Момент отрыва ракеты «Сатурн-V» с «Аполлоном-11» от стартового стола. Зал управления полетом Космического центра им. Кеннеди во время старта (противоположная страница).

НАЗАД ВО

ПОЛВЕКА
СПУСТЯ ПОСЛЕ
«АПОЛЛОНА-11»
МЫ ВСПОМИНАЕМ,
КАК ДОСТИГЛИ
НЕВОЗМОЖНОГО
И ПОЧЕМУ
МЫ ДОЛЖНЫ
ПРОДЕЛАТЬ ЭТО
СНОВА

▲ Базз Олдрин стоит рядом с устройством для регистрации состава солнечного ветра. Отпечаток его ботинка (на противоположной странице).



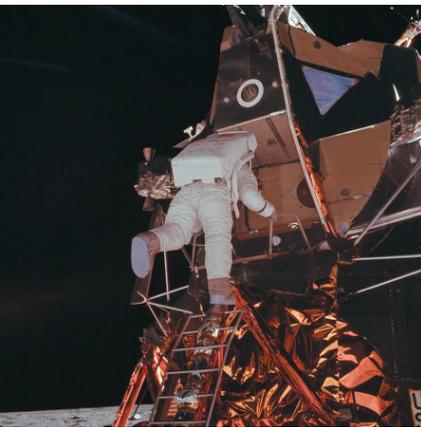
ВРЕМЕНИ



Нил Армстронг считал, что шансы справиться с заданием у него были 50 на 50. «Так много неизвестных, — сказал в интервью 2011 г. австралийской аудиторской фирме первый человек, ступивший на Луну. — Была большая вероятность, что там будет нечто, чего мы не понимаем достаточно хорошо, и мы [будем вынуждены] аварийно завершить полет и вернуться на Землю, не осуществив посадку». Он, а также Эдвин «Базз» Олдрин и Майкл Коллинз — с помощью тысяч инженеров, ученых и специалистов по управлению лунной экспедицией NASA — справились

с задачей, и посадка на Луну остается одним из самых невероятных достижений человечества.

Только подумайте: в этом месяце 50 лет назад ракета «Сатурн-V» высотой с 36-этажный дом, весящая как 400 слонов, набирая высоту, оторвалась от Земли, подталкиваемая вверх горячей струей, более мощной, чем 85 гидроэлектростанций на плотине Гувера. Будучи уже в космосе, астронавты ушли с околоземной орбиты, совершили путешествие к окололунной орбите, а затем отстыковали посадочный модуль от своего космического корабля и направили его для мягкой посадки



◀ **Олдрин** спускается по лестнице с лунного модуля «Аполлона-11», чтобы впервые ступить на поверхность Луны

▶ **Тень Нила Армстронга** видна на этом сделанном им самим фото с лунным модулем в отдалении



▲ **Джордж Лоу**, руководитель космической программы «Аполлон», и другие сотрудники Центра управления экспедицией следят за экранами своих пультов в зале управления космической экспедиции

▶ **Армстронг** машет рукой, когда он и его экипаж направляются к стартовому столу 16 июля 1969 г.



на чужую почву. Возможно, еще более впечатляет то, что после прогулки они забрались назад в свой лунный модуль, взлетели с поверхности другого небесного тела (снова впервые в мире), состыковались с командным модулем, летящим по орбите примерно в 100 км от лунной поверхности, и направились назад к Земле; а спустя два дня благополучно приводнились в Тихом океане.

После этого головокружительного успеха мечтали во всем мире уже вообразили, что еще лишь несколько шагов — и появятся колонии на Луне, а отпуск мы будем проводить на Марсе. Однако с тех пор как последний астронавт экспедиции

«Аполлон» покинул лунную поверхность в 1972 г., никто из людей на нее не ступал, а планы отправить человека на Марс или куда-нибудь еще в Солнечной системе едва ли определены более четко, чем тогда. Наверное, каждый последующий президент давал обещание послать еще один экипаж на Луну, но к настоящему времени все эти заявления стали восприниматься как проявления сказочного несбыточного оптимизма. Когда вице-президент Майк Пенс в марте объявил, что администрация Трампа намерена высадить астронавтов на поверхность Луны к 2024 г., общественность восприняла это скептически. Но юбилей

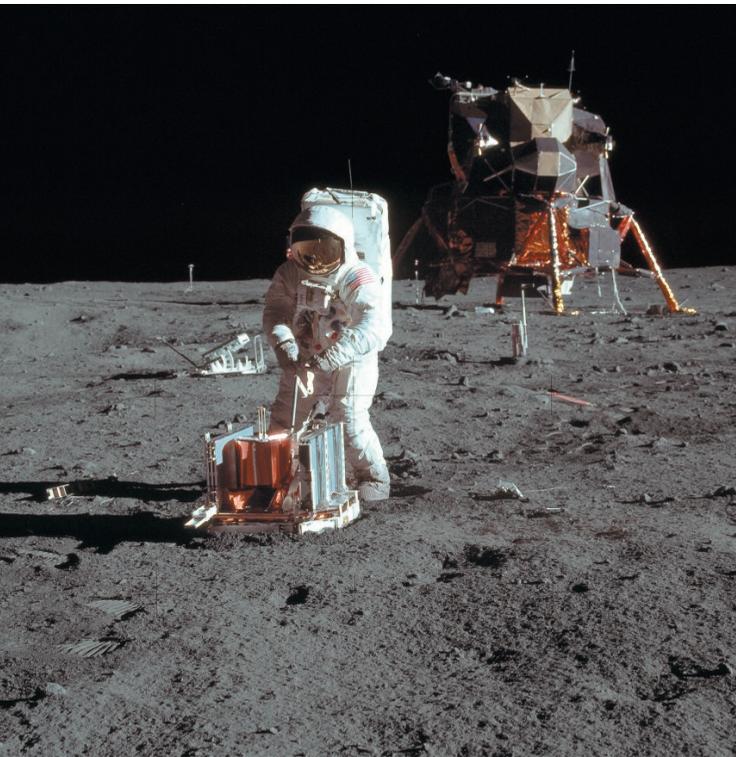
CLOCKWISE FROM TOP LEFT: NASA (Aldrin); lunar module and Armstrong; crewmates); GETTY IMAGES (mission control)



▲ Представители прессы наблюдают старт «Аполлона-11» из Космического центра им. Кеннеди



▲ Поднявшись в кабину лунного модуля после прогулки по Луне, Олдрин сразу же сделал это фото ликующего Армстронга



◀ Олдрин устанавливает на Луне пассивный сейсмограф



▲ На борту лунного модуля Олдрин вслушивается в сообщения, передаваемые через его переговорное устройство



◀ Земля поднимается над горизонтом во время полета лунного модуля над поверхностью спутника

«Аполлона-11» напоминает нам, что выполнимость этой до смешного честолюбивой цели на самом деле уже была доказана — за короткий срок, во времена, когда компьютеры были размером с комнату, когда США проигрывали войну во Вьетнаме, когда женщины маршировали по улицам, требуя равенства, а афроамериканцы сражались, зачастую жертвуя жизнью, за право считаться полноценными людьми.

Люди часто вспоминают время посадки на Луну как одну из самых ярких страниц истории страны, как время, когда все было проще, лучше и полно надежд. И все же «Аполлон-11» не был воплощением

великой эпохи, напротив, он показал, что мы можем свершать великие дела и в ужасные времена. Что даже когда мы испытываем большие трудности, когда наше общество разделено, а весь мир сходит с ума, мы должны преследовать грандиозные цели. «Аполлон-11» продемонстрировал нам лучшие человеческие качества именно тогда, когда мы в этом нуждались. Сейчас, когда наша планета испытывает аналогичное противостояние, мы действительно могли бы отправить ракету к Луне — независимо от того, вернемся мы на нее или нет. ■

Клара Московиц

CLOCKWISE FROM TOP: MARIO DE BIASE/Getty Images (press corps); NASA (Armstrong); GETTY IMAGES (Aldrin on board); NASA (lunar module in orbit); ALCANTARA (Aldrin on lunar surface)



Место прилунения

КАРТИРОВАНИЕ

SOURCES: NASA/GSFC/ARIZONA STATE UNIVERSITY (moon);
NASA (astronauts and equipment)

Двойной кратер

ТВ-камера

Лунный модуль «Орел»

Угловой отражатель для лазерной локации

Комплект оборудования пассивного сейсмографа

Следы, оставленные
Нилом Армстронгом

«БАЗА СПОКОЙСТВИЯ»

СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНИКА ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ И 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЗВОЛЯЮТ НАМ ПО-НОВОМУ ВЗГЛЯНУТЬ НА ТО, КАК «АПОЛЛОН-11» ОТЫГРАЛ СВОЮ ПАРТИЮ



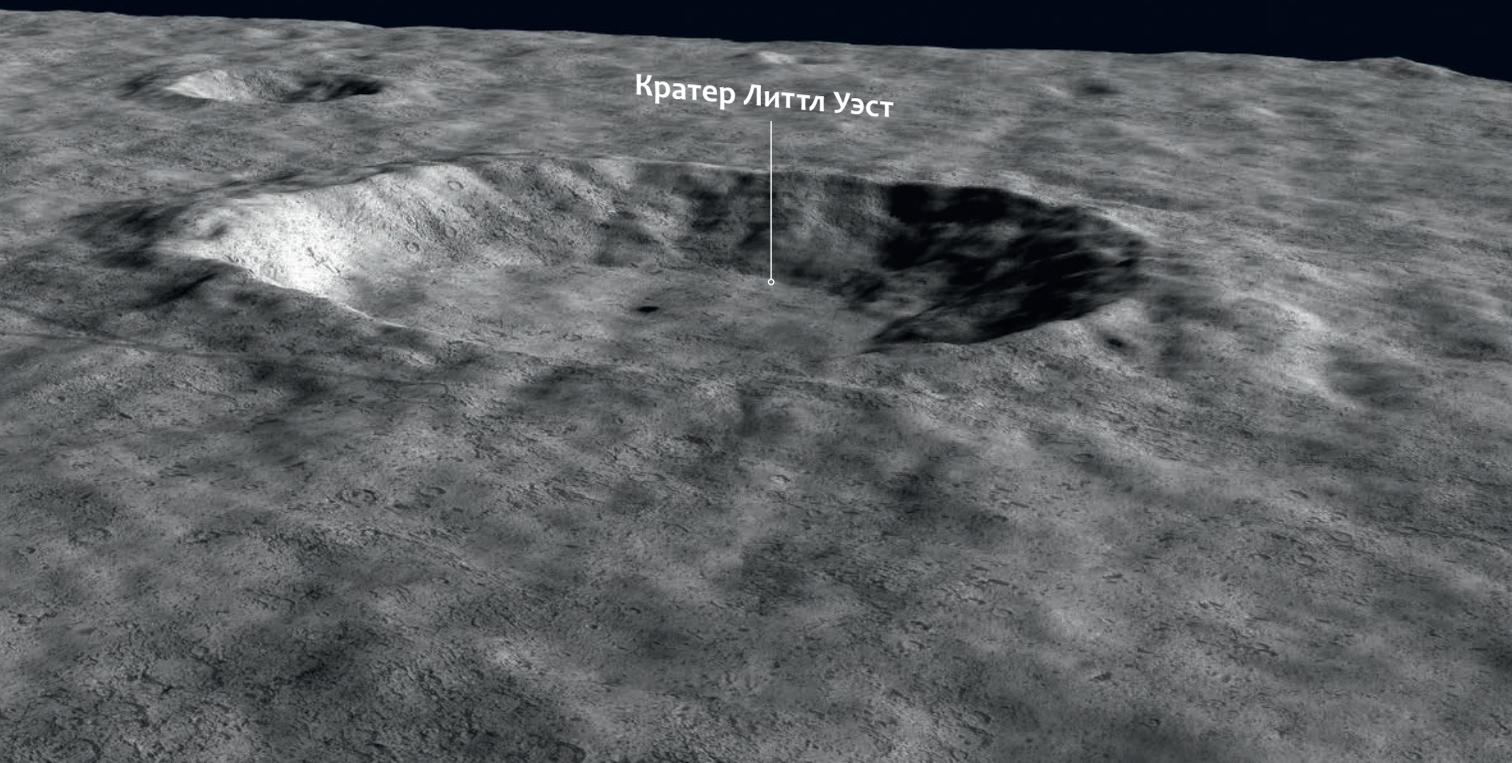
Текст и иллюстрации: Эдвард Белл

МИССИИ

Когда прямой репортаж с «Аполлона-11» появился в эфире, люди в своих домах смогли следить за происходящим, глядя на зернистое, но будоражащее чувства изображение видеотрансляции. Однако они имели слабое представление о том, где на Луне происходит действие и насколько большой участок исследовали астронавты. Сейчас трехмерные компьютерные модели, основанные на недавних изображениях, полученных со спутников, могут воскресить каждый шаг лунной экспедиции и территорию, которую она исследовала. На основе фотографий места посадки, сделанных «Лунным орбитальным разведчиком» (LRO) NASA в 2012 г.,

найден профиль высот поверхности Луны, где прошли Нил Армстронг и Базз Олдрин, а также местоположение лунного модуля, приборов и даже оставленные астронавтами следы.

Изображения, полученные спутниками, помогают сохранить детали экспедиции, которые в конце концов будут потеряны навсегда: экстремальные температуры, солнечная радиация и ослабевающая бомбардировка микрометеоритами поверхности Луны разрушают следы и когда-нибудь сотрут с лица Луны даже оставленное оборудование. Постепенно «База Спокойствия» исчезает.



Кратер Литтл Уэст

Последние минуты

Тщательно спланированную экспедицию чуть не погубили несколько неожиданно возникших препятствий, когда «Орел» шел на посадку. Эта карта, созданная с использованием той же самой техники трехмерного моделирования, что и для построения карты на предыдущей странице, показывает высоту лунного модуля в моменты сильного волнения, когда Армстронг провел его мимо намеченного места посадки — которое, как оказалось, изобиловало опасными валунами — и нашел новое буквально на лету.

Неприятности начались на высоте примерно 10 км, когда на приборном щитке «Орла» замигала лампа аварийной сигнализации с маркировкой «тревога программы 1202». «Что такое?» — спросил Армстронг Олдрина, когда замигал свет и с нерегулярными интервалами зазвонил сигнальный звонок. Никто из них ни разу не слышал подобного сигнала тревоги во время своих предполетных тренировок на тренажере. В конце концов специалисты центра управления сообщили по радио, что тревогу можно спокойно игнорировать, а попытка выяснить ее причину приведет к потере драгоценного времени.

По мере того как запасы топлива уменьшались, маневрировать «Орлом» становилось все труднее. Когда уровень топлива в баке упал ниже 50%, горючее стало сильно плескаться, резко раскачивая лунный модуль во всех направлениях. Эта проблема также вызвала преждевременное (раньше на 30–45 с) включение сигнала, предупреждающего о низком уровне топлива, вызывая у астронавтов ощущение, что для безопасной посадки на поверхность у них осталось меньше времени, чем было на самом деле.

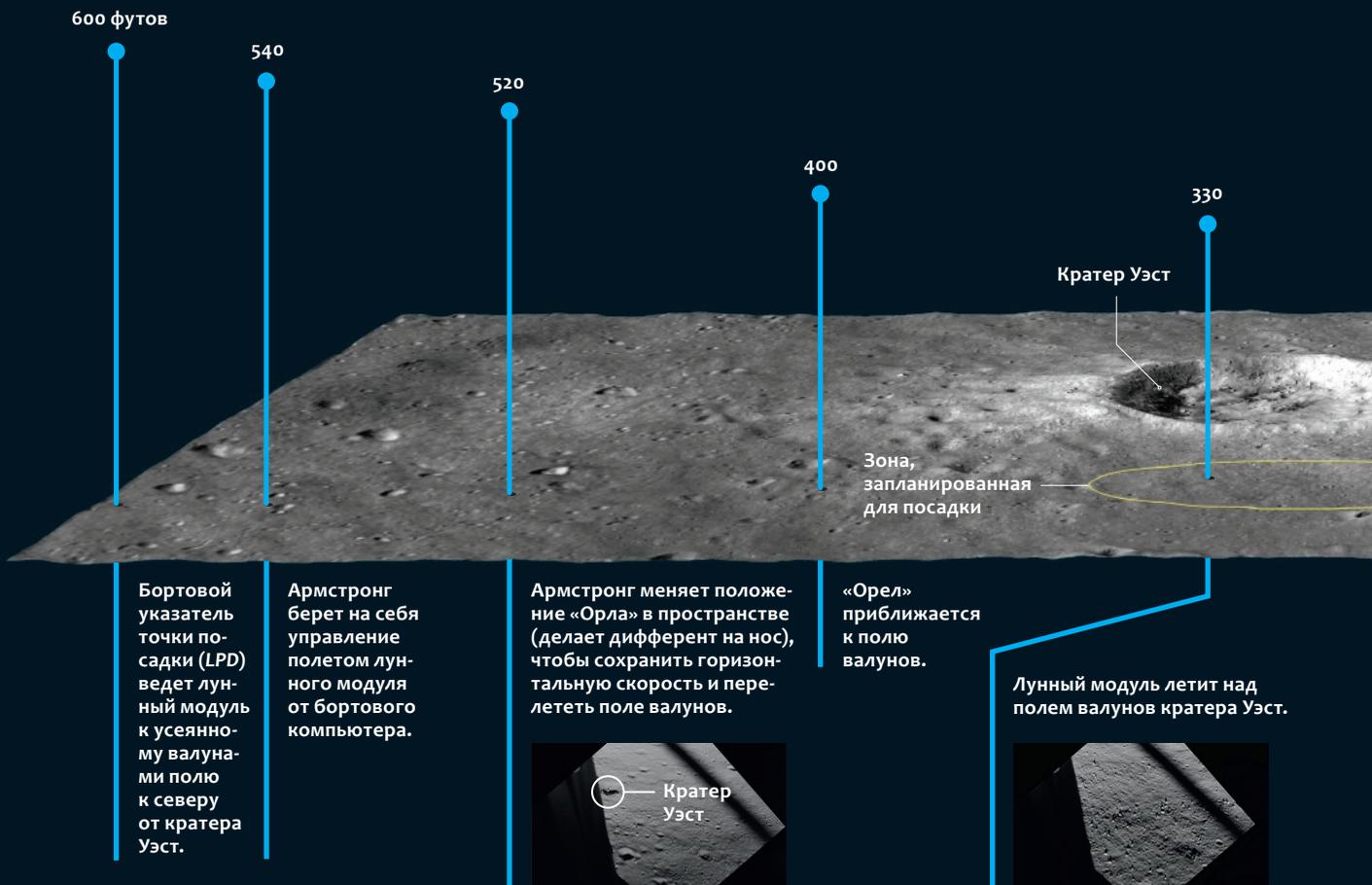
ОБ АВТОРЕ

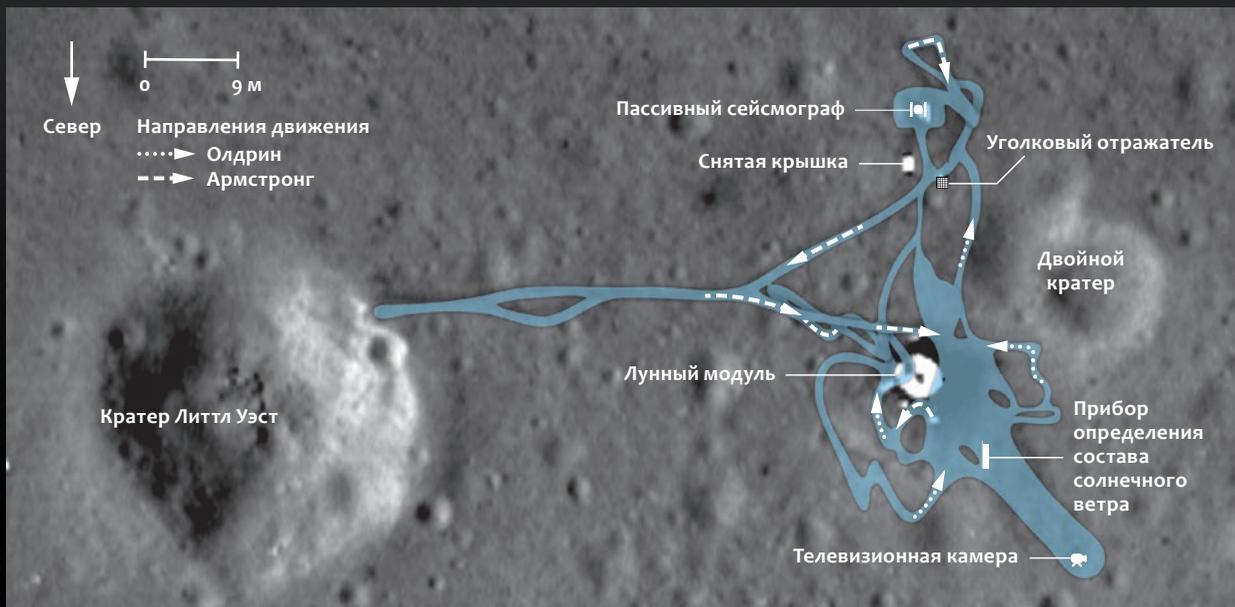
Эдвард Белл (Edward Bell) — главный художник журнала *Scientific American* и создатель анимационных фильмов о планетологии, автор завоевавшей награды электронной книги «Путешествие к экзопланетам».



Наконец, когда «Орел» находился на высоте около 600 м, Армстронг выглянул из своего иллюминатора, чтобы лучше разглядеть предполагаемое место посадки. (Он должен был сделать это несколькими минутами раньше, но, как он сказал позднее в докладе по возвращении с задания, «все наше внимание было направлено на то, чтобы устранить причины сигналов тревоги, удерживать аппарат в полете и удостовериться, что система управления работает надлежащим образом и не требуется аварийное завершение полета. Основное внимание в это время было направлено на то, что находилось в кабине».) Ему не понравилось, то, что он увидел. Как он описывал это в том же докладе, место посадки представляло собой «большой скалистый кратер, окруженный большим полем, заваленным валунами, значительная часть поверхности которого была усеяна крупными скалами».

Топливо и время заканчивались, и Армстронг принял управление космическим аппаратом на себя, отключив бортовой компьютер на высоте 165 м. В самый последний момент он провел «Орла» над полем валунов, чтобы безопасно посадить его на относительно плоскую площадку.

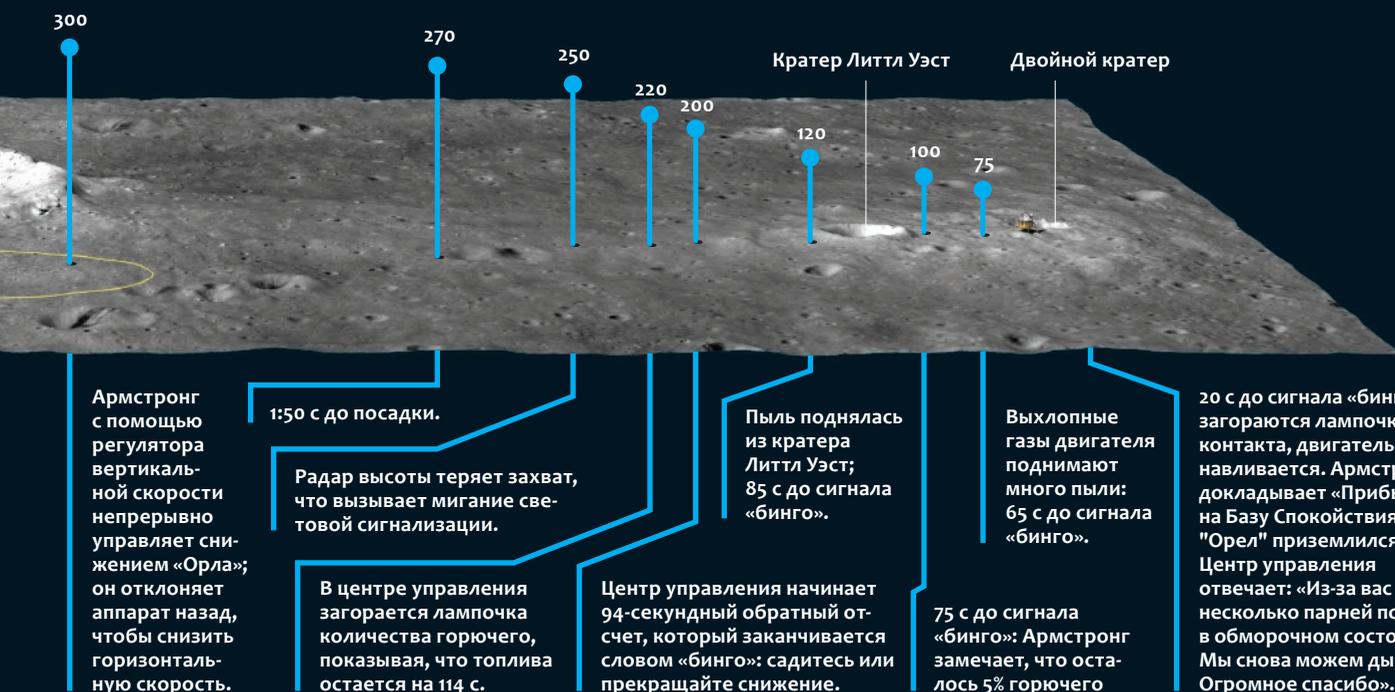




По следам астронавтов

За армстронговским «одним маленьким шагом для человека» последовало много других, когда он и Олдрин устанавливали оборудование и исследовали лунную поверхность. Кадры высокого разрешения с камеры спутника LRO, представленные здесь с трассировкой для визуального выделения, показывают потревоженную лунную пыль, которую два астронавта подняли за два с половиной часа своей прогулки по «Базе Спокойствия». Большую часть их прогулки занимала установка научного оборудования, включая приборы пассивного

сейсмического эксперимента, призванного фиксировать «лунотрясения»; эксперимента по изучению состава солнечного ветра, которые собирали образцы частиц солнечного ветра для дальнейшего анализа; и угловой отражатель для лазерной локации — для измерения параметров орбиты Луны и изменения ее расстояния от Земли. Самым далеким путешествием от места посадки «Орла» была незапланированная прогулка, предпринятая Армстронгом к краю кратера Литтл Уэст, на расстояние примерно 60 м.



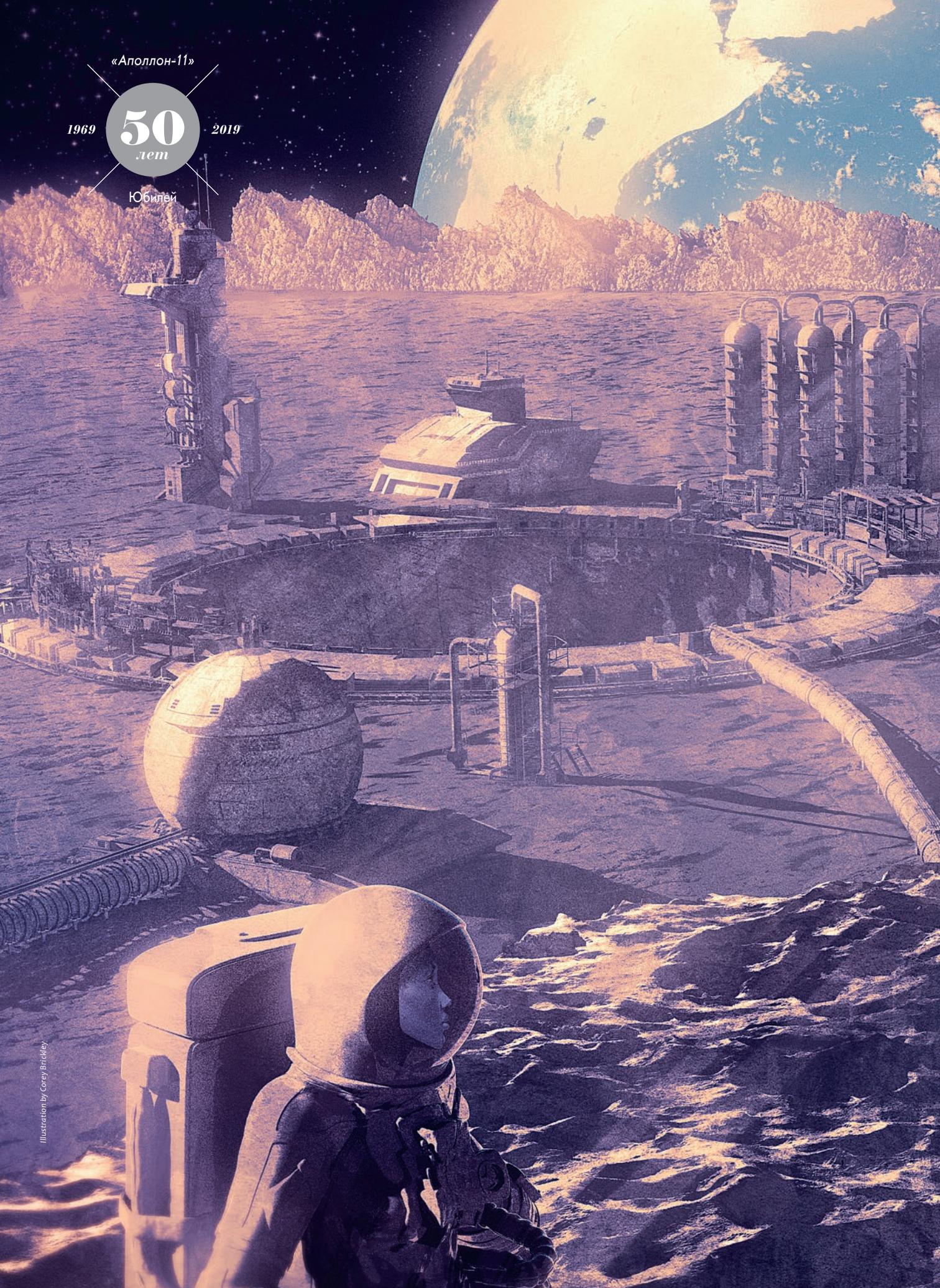
«Аполлон-11»

1969

50
лет

2019

Юбилей



ЗАХВАТ ЛУННОЙ ТЕРРИТОРИИ

A detailed illustration of a lunar base. In the foreground, a large, segmented cylindrical structure, possibly a habitat or storage unit, is partially visible. In the middle ground, two astronauts in full suits are standing on the rocky, cratered surface of the moon. To the right, a large, dark, rectangular structure, likely a lander or part of the base, is visible. In the background, a complex of various structures, including a dome and solar panels, is situated on a higher plateau. The sky is a deep, dark blue with a few stars, suggesting a night or twilight scene on the moon.

НОВАЯ ГОНКА С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ
В СОБСТВЕННОСТЬ ЦЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ
ЛУНЫ, ВОЗМОЖНО, БУДЕТ РАЗГОРЯТЬСЯ,
НЕСМОТЯ НА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ
ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА

Адам Манн

ОБ АВТОРЕ

Адам Манн (Adam Mann) — журналист, специализирующийся на астрономии и физике. Его работы публиковались в журналах *National Geographic*, *Wired*, газете *Wall Street Journal* и других изданиях.



Крупнозернистое черно-белое изображение во весь экран — одно из самых ранних воспоминаний Боба Ричардса (Bob Richards): космические скафандры, лунный модуль, астронавты Нил Армстронг и Базз Олдрин делают исторические первые шаги по поверхности Луны. Ричардс, в то время только что выросший из пеленок, вспоминает, как он сидел в семейной гостиной к северу от Торонто, а его отец безуспешно боролся с настольной телескопической антенной, пытаясь улучшить качество телевизионной картинки, транслируемой из Буффало, штат Нью-Йорк.

«Полет "Аполлона-11" стал определяющим моментом для человечества, — утверждает основатель и исполнительный директор компании "Лунный экспресс" (Moon Express), которая надеется наладить транспортное сообщение с нашим естественным спутником и в конце концов заняться добычей там полезных ископаемых. — Вдохновляющий пример программы "Аполлон" весьма заметно влияет на то, что сегодня происходит в космосе».

Тогда, в 1960-е гг., казалось, что это лишь вопрос времени, когда человечество вырвется из оков Земли и начнет медленно расползаться по всей Вселенной. Хотя это заняло больше времени, чем ожидали многие, возможно, уже вскоре что-нибудь похожее на это должно случиться. Примерно полдюжины правительств, а также несколько частных компаний запланировали лунные экспедиции в ближайшем будущем — ситуация, чреватая конфликтами.

Договор о космосе (*официальное название: «Договор о принципах деятельности государств по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела»*. — *Примеч. пер.*), который США, Великобритания и Советский Союз подписали менее чем за два года до полета «Аполлона-11» (и участниками которого на сегодня стали 109 стран),

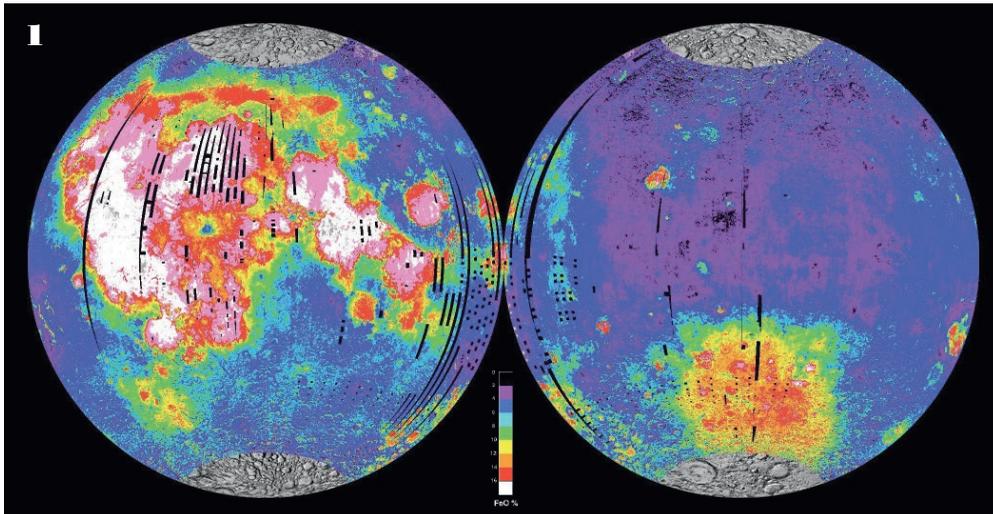
оговаривает, что исследование космоса должно проводиться мирными средствами и на благо всех народов. В нем также говорится, что никто не может заявлять свои права на территорию на каком-либо небесном теле. Но ниже в тексте договора имеется лазейка: два «положения о невмешательстве», которые требуют от всех подписавших договор стран избежать причинения вреда зондам или аванпостам других стран — например, причаливая сверху или рядом с ними. Этот пункт выглядит достаточно разумным, но одновременно он создает брешь, позволяющую стране или частной компании монополизировать приглянувшийся им участок, просто прибыв туда первыми.

Застолби одна из стран или компаний участок, и это «положит начало борьбе за Луну, похожей на борьбу за колонии в Африке, которая разразилась после обнаружения в Конго в 1880-е гг. полезных ископаемых», — пишут астрофизик Мартин Элвис (Martin Elvis) из Центра астрофизики Гарвардского университета и Смитсоновского института и его соавторы в статье 2016 г. в журнале «Космическая политика» (*Space Policy*).

Вне всякого сомнения, все несколько экспедиций, запланированные на несколько ближайших лет, нацелены на одну и ту же территорию.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Большое число стран и частных компаний намерены послать экспедиции на Луну в ближайшем десятилетии.
- Международное законодательство говорит, что никто не может обладать собственностью в космосе, — однако оно также говорит, что если субъект права совершил посадку на какое-нибудь небесное тело, то другим следует избегать нарушения границ в районе этой площадки.
- Эта лазейка создает потенциал для гонки с целью застолбить право на некоторые из самых лакомых объектов недвижимости на Луне.



Карта распределения залежей железа на Луне (1), полученная космическим зондом «Клементина» в 1994 г. Макет лунного посадочного модуля Blue Moon (2), разрабатываемого компаниями Blue Origin.



Индийская экспедиция «Чандраян-2» («Лунный корабль — 2»), старт которой намечен на июль, будет направлена на полюсы Луны. Китайское национальное космическое управление заявило, что по крайней мере три их следующих зонда также будут отправлены к полюсам. Российское космическое агентство «Роскосмос» разрабатывает программу «Луна-Глоб», которая предусматривает посадку возле кратера Богуславский недалеко от южного полюса, возможно, еще в 2021 г. В том же году Япония намерена запустить *SLIM* («Умный спускаемый аппарат для исследования Луны»), который, вероятно, продемонстрирует необычайно высокую точность посадки на небольшие детали лунной поверхности. NASA, Европейское космическое агентство и все большее число частных компаний также смотрят в сторону Луны. В мае исполнительный директор компании *Amazon* Джефф Безос (Jeff Bezos), основавший аэрокосмическую компанию *Blue Origin*, обнародовал планы создания лунного посадочного модуля *Blue Moon*, который, по его словам, возможно, будет готов нести экипаж в течение уже ближайших пяти лет.

Компания *Moon Express* намерена совершить посадку на южном полюсе Луны в 2021 г. И если ее космический аппарат прибудет туда раньше всех

других, говорит Ричардс, компания желает что-нибудь за это получить. «Это одна из наших побудительных причин — добраться туда первыми, — говорит он. — И мы ожидаем, что наши права на невмешательство будут уважать».

Вода — нефть космоса

На Луне достаточно недвижимости, чтобы хватило на всех, — суммарная площадь поверхности примерно равна площади Африки, — но ресурсы распределены неравномерно. Железо и титан, которые, возможно, окажутся полезными для строительства на Луне жилищ и техники, находятся в изобилии в различных областях лунной поверхности. Месторождения гелия-3, который мог бы служить топливом для реакторов термоядерного синтеза, встречаются в районах, где находится верхний слой лунного реголита. И «ресурсы» не ограничиваются извлекаемыми материалами. Некоторые элементы рельефа, такие как жерла определенного типа кратеров, могли бы предоставить астронавтам радиационную защиту, а площадки на обратной стороне Луны, которые экранированы от земных радиопомех, особенно хорошо подходят для размещения телескопов.

В ближайшей перспективе самый необходимый ресурс — вода. Астронавты могут пить воду или разлагать ее на составляющие элементы и превращать их в топливо для ракет. Несколько самых многообещающих площадок для добычи воды — так называемые пики вечного света на северном и южном полюсах Луны. Это вершины кратеров, географические объекты, которые часто образуются на краях метеоритного кратера или рядом с ними, когда астероид сталкивается с поверхностью и смещает породу в стороны, где она выталкивается вверх, образуя кольцевой гребень. В силу особенностей орбитального движения Луны Солнце освещает эти пики почти непрерывно, представляя постоянный источник энергии солнечным

батареям. Астронавты могли бы разместить здесь базы, чтобы извлекать воду, удобно находящуюся поблизости, на дне этих же кратеров, где в постоянно затененных областях смог аккумулироваться лед.

Каждый из полюсов содержит примерно полдюжины таких пиков вечного света, каждый из которых в поперечнике размером несколько сот метров. Учитывая, что они — относительная редкость, легко понять, почему принцип невмешательства, вероятно, станет для стран удобным способом заявить свои права на ту или иную территорию. «Они настолько малы, что никто другой не сможет высадиться на такой площадке, не рискуя нанести ущерб космическому аппарату, который уже находится там, — говорит Иэн Кроуфорд (Ian Crawford), ученый-планетолог из Лондонского университета Биркбек, изучавший лунные ресурсы. — Первая компания или страна, которая высадится на этих пиках, независимо ни от каких юридических тонкостей *de facto* получит их в собственность».

Дыры в законодательстве

Договор о космосе был написан полвека назад, в основном двумя странами — США и СССР, которые в то время были единственными способными достичь Луны. Ученые-правоведы с тех пор обсудили возможные последствия договора, и последнее развитие событий, таких как рост числа коммерческих космических полетов, подняло вопросы, которые в то время ни у кого не были на повестке дня.

В 2015 г. Конгресс США разжег международные споры, возникшие из-за несовпадения точек зрения государств, приняв Закон о конкурентоспособности американских коммерческих космических запусков, где указано, что хотя никто не может заявлять свою собственность на небесном теле, любые материалы, извлеченные из него, с юридической точки зрения принадлежат тому, кто вел их добычу, и, следовательно, могут быть проданы для получения прибыли. В 2017 г. представители России, Бразилии и других стран заявили на мартовской сессии Комитета Организации Объединенных Наций по использованию космического пространства в мирных целях (КОПУОС), что такая добыча полезных ископаемых вне Земли — один из видов присвоения *de facto* и чтобы регулировать операции по добыче полезных ископаемых, необходимо создать международный консорциум.

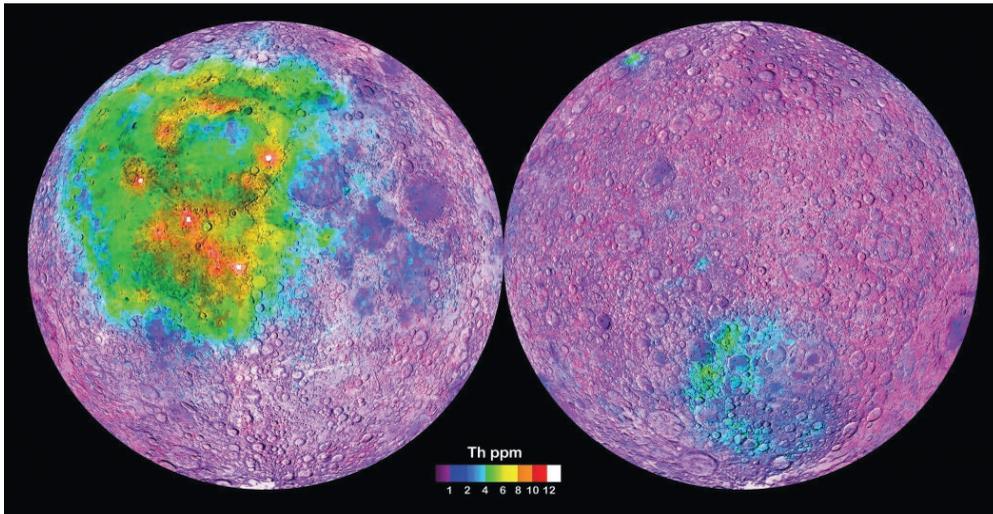
Другие страны — включая такие, как Люксембург, который сам хотел бы стать одним из ведущих игроков в дележе ресурсов космоса, — приняли сторону США с их интерпретацией закона, допускающей большую свободу действий. Китайская делегация на сессии КОПУОС балансирует между двумя сторонами и, по-видимому, ждет, чья возьмет верх. «Международное право вырабатывается странами коллективно, — говорит Франс фон дер Дунк (Frans

von der Dunk), профессор права Университета штата Небраска в Линкольне, специализирующийся на космическом праве. — Если один говорит, что это законно, а другой утверждает, что это требует режима международного взаимодействия и лицензирования, то у вас большая проблема».

По состоянию на сегодня наиболее привлекательные районы на Луне, скорее всего, будут захвачены на основе принципа «Кто первым встал, того и тапки», предоставляя преимущество богатым странам и компаниям, которые скоро смогут туда добираться. Менее богатые страны, вероятно, испытывают вражду по отношению к тем, которые заявляют свои права, обостряя напряженность. В данный момент нет никаких гарантий, что районы, интересные с научной точки зрения, останутся нетронутыми. Нам следует противостоять этим сложным проблемам до того, как начнется серьезная эксплуатация, говорит Тони Миллиган (Tony Milligan), специалист в области этики Лондонского Королевского колледжа и соавтор Мартина Элвиса. «Как только вы добились постоянного присутствия на Луне, закон начинает выглядеть совершенно иначе и колоссальные лазейки, через которые вы можете провести свой космический корабль, вдруг становятся более рельефными», — замечает он.

Многим кажется, что китайская космическая программа с ее политической направленностью и хорошими техническими возможностями имеет в этом соревновании преимущество. Китайские инженеры утверждали, что могут посадить аппарат на поверхность Луны с точностью в несколько сантиметров. С помощью запланированных на ближайшее время запусков серии лунных автоматических станций «Чанъэ» они намерены доставить на Землю образцы грунта и провести детальное топографическое обследование в районе полюсов. Возможно, в интересах других стран начать выработку правил, которыми могли бы руководствоваться потенциальные конкуренты, даже если это означало бы отказ от автономии, говорит фон дер Дунк.

Некоторые группы уже пытаются это делать. Несколько лет назад Таня Массон-Зваан (Tanja Masson-Zwaan), эксперт в области космического права Лейденского университета в Нидерландах, стала одним из основателей Гаагской международной рабочей группы по управлению космическими ресурсами, организации, которая объединила правительство, промышленность, научное сообщество и другие институты, чтобы сформулировать рекомендации по добыче полезных ископаемых вне планеты Земля. В 2017 г. группа выработала структурные элементы для лежащих в юридической основе принципов, чтобы обеспечить баланс интересов различных сторон в соответствии с международным правом. Массон-Зваан рекомендует учредить что-нибудь наподобие Международного союза телекоммуникаций, агентства ООН, которое



Данные, полученные в ходе космической экспедиции NASA «Лунный изыскатель» (Lunar Prospector), показывают распределение концентрации тория на поверхности Луны. Этот металл предлагают использовать в качестве возможного топлива в ядерных реакторах, что делает его потенциальным объектом добычи.

распределяет орбиты спутников и диапазоны спектра радиочастот с целью регулировать добычу полезных ископаемых на Луне.

Риски и вознаграждения

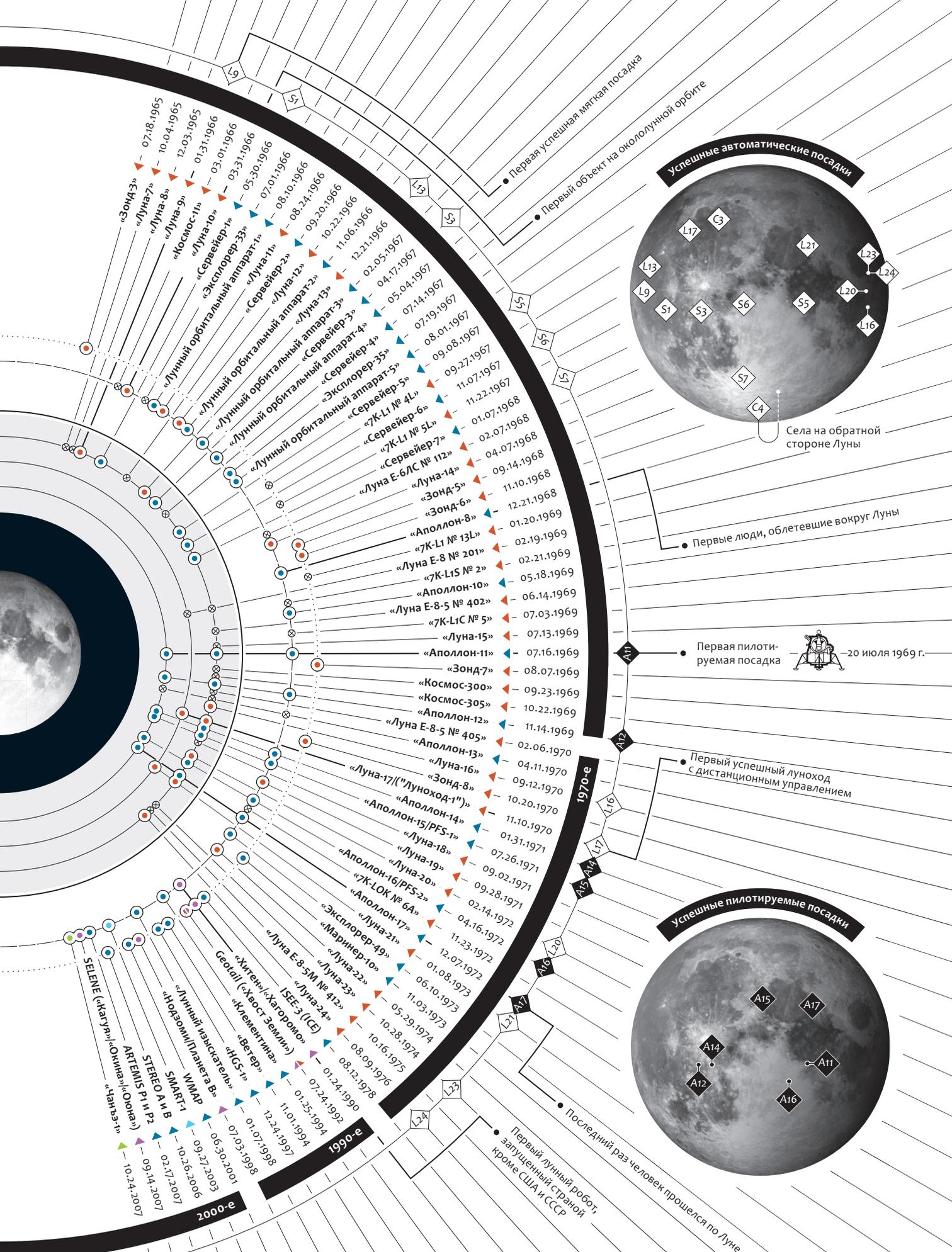
Хотя планы захвата лунной недвижимости уже разрабатываются, добыча полезных ископаемых, таких как редкие металлы, и доставка их на Землю — цель отдаленного будущего. Некоторые даже скажут, что это фантастика. Учитывая невероятно высокую стоимость и технические проблемы одного лишь выхода в космос, не говоря о посадке на поверхность Луны, трудно представить себе, что транспортировка материалов на Землю в обозримом будущем будет приносить прибыль. Ни одной из частных компаний — «Ресурсы глубокого космоса» (*Deep Space Industries*) и «Планетные ресурсы» (*Planetary Resources*), которые были основаны в начале XXI столетия с целью добычи полезных ископаемых на астероидах, — не удалось привлечь достаточных средств, чтобы попытаться начать хоть какую-нибудь деятельность; обе они в конце концов были приобретены фирмой, занимающейся производством спутников, и криптовалютной компанией соответственно. «Это совсем не похоже на времена золотой лихорадки, когда любой, имея мулу или кирку, мог отправиться в дорогу и попытаться намыть золота», — говорит Джордж Соуэрс (George Sowers), специалист в области ресурсов космоса из Горной школы Колорадо.

Тем не менее если экономическая деятельность в космосе начнет развиваться, вслед за этим, возможно, последует и добыча полезных ископаемых, говорят эксперты. Элвис указывает на частные компании, такие как *SpaceX* Илона Маска, которые постоянно снижают стоимость запуска космических аппаратов на орбиту. Чем дешевле и проще станет выйти в космос, тем чаще будут организовываться экспедиции. Вероятно, появится потребность в топливе и других ресурсах, и доставка

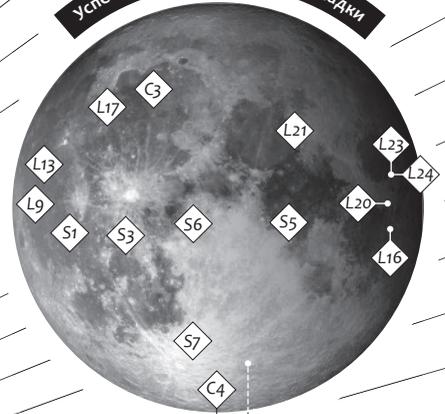
полезных ископаемых с имеющей относительно низкую гравитацию Луны станет более рентабельной, чем добыча в глубоких шахтах на нашей планете.

Ричардс полон желания сыграть свою роль в вовлечении Луны в сферу земной экономики. И все же пока даже он испытывал трудности с выходом за пределы атмосферы. Когда в 2012 г. Ричардс с партнерами основал компанию *Moon Express*, она была одной из 16, боровшихся за гугловский проект *Lunar XPRIZE* по доставке на Луну построенного на частные средства космического робота, который ездит по поверхности спутника и шлет на Землю фотографии и данные. Первоначальный крайний срок — 2012 г. — продлевался несколько раз, последний раз до марта 2018 г., но в январе того года фонд *XPRIZE* вынужден был признать, что награду в \$30 млн получить не сможет никто.

Сейчас компания *Moon Express* планирует отправить свой первый аппарат на лунную орбиту в 2020 г. Остается только ждать, чтобы посмотреть, окажется ли ее бизнес-модель — предложение космическим агентствам и частным компаниям доставить свой груз на Луну — жизнеспособной в долговременной перспективе. Когда Ричардсу задают вопрос, не видит ли он конфликта между желанием застолбить участок и необходимостью добиться устраивающего всех решения, он углубляется в дебри философии. Противоречия в Договоре о космосе отражают противоречия между системами ценностей двух стран, которые его написали, отвечает он. Коммунистические Советы рассматривали мир с коллективистской точки зрения, когда имущество должно распределяться в равных долях между всеми, тогда как капиталисты-американцы верили в большую степень личной свободы. «Именно поэтому договор допускает различные интерпретации, — говорит он. — Я полагаю, что у нас есть шанс покорить новые рубежи, не покоряя друг друга».



Успешные автоматические посадки



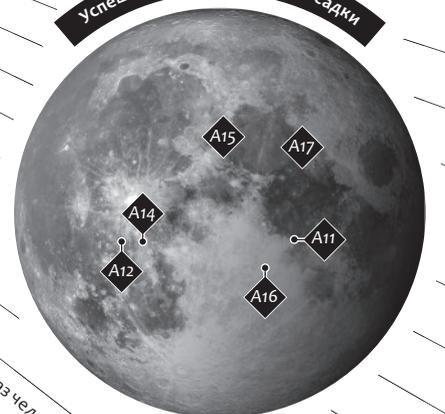
Села на обратной стороне Луны

• Первые люди, облетевшие вокруг Луны

• Первая пилотируемая посадка  20 июля 1969 г.

• Первый успешный луноход с дистанционным управлением

Успешные пилотируемые посадки



• Первый лунный робот, запущенный страной кроме США и СССР

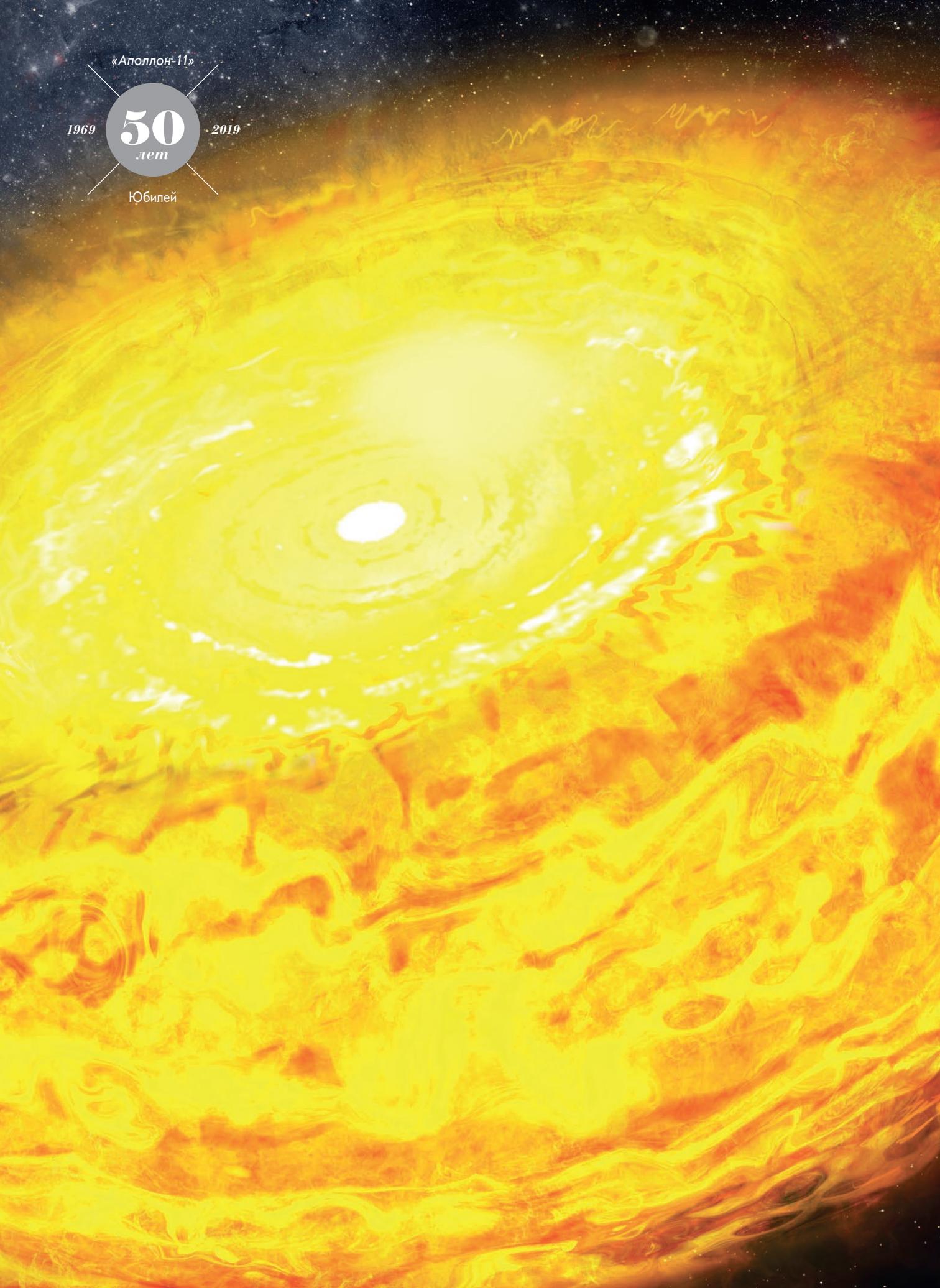
«Аполлон-11»

1969

50
лет

2019

Юбилей





ИСТОРИЯ НАЧАЛА

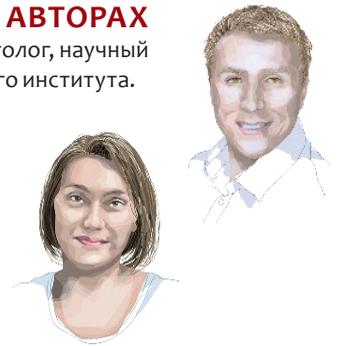
СОВЕРШЕННО НОВЫЙ КЛАСС
АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ –
СИНЕСТИИ – МОЖЕТ СТАТЬ КЛЮЧОМ
К РЕШЕНИЮ ЗАГАДОК ГЕНЕЗИСА ЛУНЫ

Саймон Локк и Сара Стюарт

ОБ АВТОРАХ

Саймон Локк (Simon J. Lock) — ученый-планетолог, научный сотрудник Калифорнийского технологического института.

Сара Стюарт (Sarah T. Stewart) — профессор планетологии и геофизики Калифорнийского университета в Дейвисе. В 2018 г. Фонд Макартуров присудил ей стипендию, называемую также «грантом для гениев», за ее работы по синестиям.



1 августа 1971 г., исследуя восточный край плато застывшей лавы, известного как Море дождей, на тихой, безмолвной поверхности Луны, астронавты «Аполлона-15» Дэвид Скотт и Джеймс Ирвин нашли нечто замечательное: очень старый осколок лунной коры, реликт возрастом более 4 млрд лет, который таил в себе ключ к загадке образования Луны. Увидев мерцание древних кристаллов, впрессованных в то, что впоследствии будет названо «Камнем бытия», Скотт сразу же понял его потенциальную важность для решения загадки происхождения Луны. «Я полагаю, мы нашли то, зачем сюда прибыли», — сообщил он по радио в центр управления, когда вместе с Ирвином извлек камень и положил его в мешок. Он станет ключевой частью величайшего научного наследия программы «Аполлон».

Изучение Камня бытия и почти 400 кг других образцов породы, доставленных на Землю астронавтами «Аполлона», полностью перевернуло наши представления об истории Луны. Приведя к перевороту в науке, эти драгоценные образцы обнулили преобладавшие тогда теории — что Луна была захвачена земной гравитацией или сформировалась вместе с Землей. — раскрыв новые важные детали, такие, как тот факт, что новорожденный спутник был покрыт океаном магмы.

Огромная энергия, необходимая, чтобы образовать лунный океан магмы, указывает

на радикально новую идею происхождения Луны: мысль о том, что ближайшая соседка Земли сформировалась в результате гигантской катастрофы — столкновения между Протоземлей и другим небесным телом размером с планету. Концепция, построенная на основе математических расчетов, показывает, что растущие планеты сталкиваются друг с другом, а также любопытное обстоятельство, что состав Луны очень похож на состав каменной мантии Земли. Некоторые ученые даже предполагают, что такое столкновение заставило вращаться молодую

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

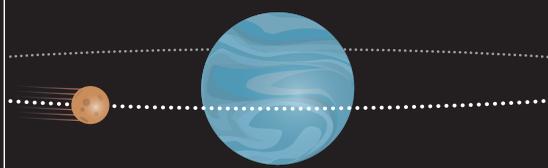
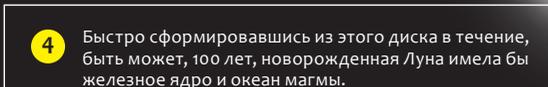
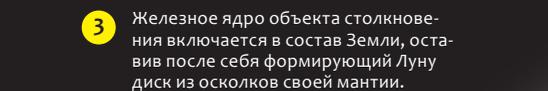
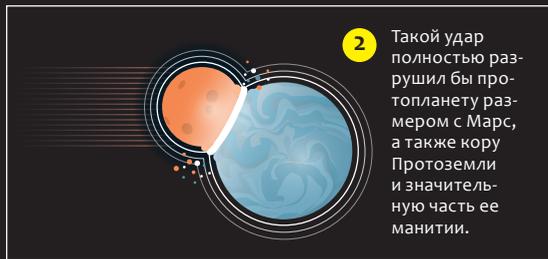
- Наша Луна образовалась почти 4,5 млрд лет назад в результате разрушительного столкновения Протоземли с другой протопланетой.
- Гипотеза гигантского столкновения в течение нескольких десятилетий доминировала в научных дискуссиях о происхождении Луны, отчасти потому, что она четко объясняла большой размер Луны и отсутствие на ней воды. Но существующая теория не в состоянии легко объяснить другие свойства Луны, такие как поразительную схожесть с Землей с точки зрения ее состава.
- Синестия (вызванный столкновением гибрид планеты и диска) — абсолютно новый класс астрономических объектов, предложенный для объяснения рождения Луны и удивительного сходства ее состава с составом Земли. Возможно, синестии — обычный исход процесса формирования планет в космосе.

Как сделать Луну

Имеющиеся факты явно указывают, что Луна образовалась около 4,5 млрд лет назад в результате столкновения между Протоземлей и другой протопланетой. Но некоторые аспекты — такие как относительное по сравнению с Землей отсутствие на Луне летучих элементов — можно лучше объяснить, если Луна сформировалась из синестии, недолговечного объекта, образовавшегося в результате гигантского столкновения.

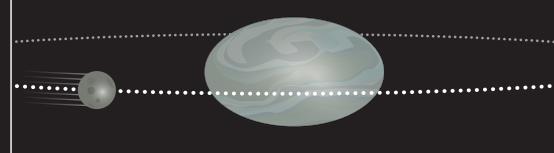
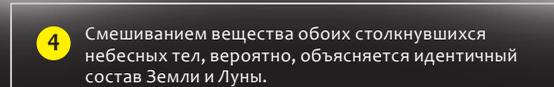
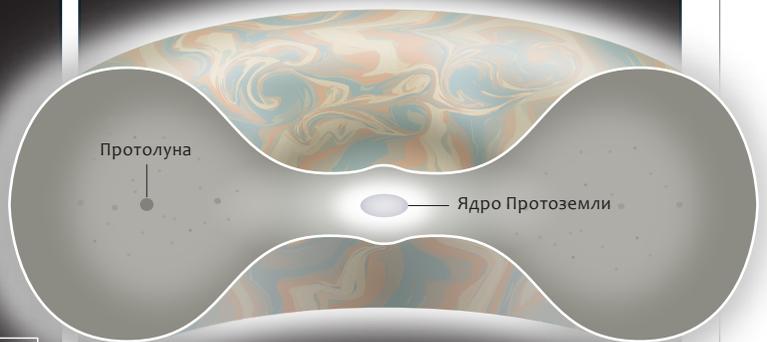
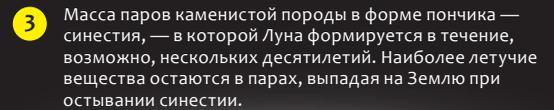
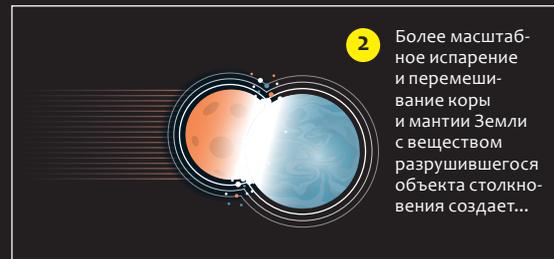
Скольльзящий удар

Каноническая модель гигантского столкновения объясняет многие характеристики Луны, такие как древний океан магмы и небольшое железное ядро.



Испеченная синестией Луна

Модификация модели гигантского столкновения, в которой Луна образуется и «выпекается» в окружающей среде с высокими температурой и давлением, может лучше объяснить другие детали, такие как почти одинаковый изотопный состав с Землей и относительный дефицит летучих элементов.



Землю, установив на ней 24-часовой цикл смены дня и ночи. Каноническая гипотеза масштабного столкновения, которая возникла на основании этих первых исследований, предполагает, что столкновение по касательной с небесным телом размером с Марс образовало вокруг Земли горячий диск из обломков каменистой породы. Луна затем слилась в одно целое из вещества этого диска — сценарий, который может объяснить большую массу Луны, недостаток воды и других легко испаряющихся веществ.

Однако гипотеза катастрофического столкновения не лишена изъянов. Самый главный из них — удивительное сходство химического состава Земли и Луны. Оба эти небесных тела сформированы из одних и тех же исходных материалов, как если бы они были планетами-близнецами, в то же время каноническая гипотеза предсказывает, что Луна большей частью должна состоять из веще-

в большинстве грандиозных соударений планета вообще не образуется. Вместо этого получается совершенно новый класс астрономических объектов, недолговечный гибрид планеты и диска, получивший название «синестия», что, возможно, объясняет многие загадочные черты Луны.

Прячась у всех на виду

Открытие синестий можно проследить на несколько лет назад, когда мы (Локк и Стюарт) озадачились вопросом, действительно ли продолжительность земных суток установилась в результате образовавшего Луну катастрофического столкновения. Этот суточный цикл со столкновением гигантского масштаба связывает фундаментальный закон физики — закон сохранения момента импульса. Вернемся во времени назад: Луна тогда была ближе к Земле, и чтобы сохранялся момент импульса, Земля должна была вращаться быстрее — гораздо быстрее: сутки должны были длиться пять часов. Другие ученые еще раньше обнаружили, что скользящее масштабное столкновение с небесным телом марсианских размеров, по-видимому, и задало суммарный момент импульса Земли и Луны. Но если продолжительность земных суток связана с чем-то другим, то событие, в результате которого образовалась Луна, скорее всего, в большей (или в меньшей) степени также повлияло на величину момента импульса, что открывает возможности для гораздо более широкого спектра сценариев столкновения. А гигантское столкновение с большим моментом импульса и большей энергией, могло (в очень редких случаях) привести к равной смеси материала двух столкнувшихся тел, теоретически объясняя статус Земли и Луны в качестве близнецов по изотопному составу.

Исследуя эту задачу с помощью моделирования примерно 100 различных сценариев столкновения гигантского масштаба с высокими энергией и моментом импульса, в результате которого образовалась Луна, мы получили результаты, на первый взгляд, не имеющие смысла. Наши диаграммы для каждого из сценариев не показывали значительного различия между «планетой» и «дискком», которого мы ожидали. Планеты после соударения были горячими и огромными, их каменистая мантия частично испарилась и раздулась до размеров объемом более чем в 100 раз больших, чем нынешний объем Земли, настолько, что они стали цепляться за окружающий их диск. Получившиеся в результате объекты больше не выглядели нормальными планетами или дисками,

Мы по-прежнему получаем новые данные из образцов, собранных экспедициями «Аполлонов», но это ограниченный ресурс, имеющий огромные пробелы

ства своего прародителя марсианских размеров. Химический состав этого прародителя должен отличаться от состава Протоземли, поскольку каждая из планет, вырастающих из газово-пылевого диска, образовавшегося вокруг молодого Солнца, содержит характерную смесь исходных строительных материалов в соответствии со своим положением на орбите. Ученые могут распознать эти различия, проведя очень точные измерения относительного состава изотопов в породе, который дает уникальные «отпечатки пальцев» для каждого планетного тела в нашей Солнечной системе — кроме Земли и Луны, которые странным образом кажутся почти одинаковыми.

Этот изотопный кризис в течение десятилетий неотступно преследовал гипотезу гигантского столкновения, но никакого более правдоподобного объяснения Луны так и не появилось. Однако сейчас после еще одной научной перезагрузки мы обнаружили, что в результате большей части катастрофических столкновений не образуются планеты, окруженные диском из обломков. Более того,

а превратились в нечто промежуточное. В момент вспышки озарения мы поняли, что в результате этих гигантских столкновений образуется нечто совершенно иное. Но нам трудно было сразу понять, что же это такое. В то время было неведомо, как это назвать, но мы воочию увидели нашу первую синестию.

Чтобы понять, что мы видим, мы вернулись к базовым принципам, подвергая пересмотру фундаментальные основы, такие как рабочее определение «планеты». Планета определяется частично своей сфероидальной формой, которая образуется в результате того, что собственная гравитация небесного тела достаточно сильна, чтобы деформировать твердую породу, как если бы это была жидкость. И все слои планеты вращаются синхронно, с небольшим разбросом, возникающим в силу внутренней динамики. Мы воспользовались программами из гидродинамики, чтобы вычислить, что происходит с планетой, похожей на Землю, когда ее каменная мантия медленно нагревается, наблюдая, как наши модели демонстрируют раздувание планеты, когда ее камни начинают испаряться. При экстремальных температурах после соударения гигантского масштаба небесное тело напоминает газовый гигант — достаточно горячий, чтобы на нем не было номинальной поверхности, а была лишь плотная атмосфера испарившихся камней, которая с ростом глубины становится все плотнее. Если такое небесное тело вращается с периодом в пять часов, оно сохраняет примерно сфероидную форму, даже когда увеличивается в размерах с повышением температуры.

Но если планета вращается еще быстрее, при нагреве происходит нечто неожиданное. По мере расширения экватора он достигает точки, в которой вращается так же быстро, как если бы он находился на орбите. Мы называем эту точку пределом синхронного вращения. Если тепла будет чуть-чуть больше, вещество начнет утекать с экватора планеты на орбиту. Внезапно с ее экватора, образуя выступ, выплескиваются пары, и планета превращается в нечто иное. В отличие от планеты, это больше не сфероид. Более того, в отличие от планеты небесное тело больше не вращается как единое целое, вместо этого у него появляется внутренняя область совместного вращения и внешняя область, вращающаяся медленнее. После некоторого размышления мы решили назвать это небесное творение синестией — в честь Гестии, греческой богини семейного очага и жертвенного огня, — поскольку мы полагаем, что Земля

когда-то была одним из таких огненных объектов. (Приставка «син-» подчеркивает синергию, которая существует между всем взаимосвязанным веществом планеты и диска.) Синестия — это то, во что превращается планета, когда тепло и центробежная сила заставляют ее выйти за пределы сфероидной формы.

Вскоре мы лепили синестии сотнями с помощью нашей компьютерной модели, разогревая вращающиеся планеты и выводя их за пределы синхронного вращения. Синестии могут иметь широкий диапазон форм и размеров в зависимости от того, как распределены в их теле масса, энергия и момент импульса. Свойства синестии зависят от того, как она была сотворена. Осторожный разогрев планеты создает синестию, которая выглядит как толстая летающая тарелка, а столкновения гигантского масштаба приводят к огромным тучным синестиям, больше похожим на пончики или на кремовые рожки. Вооружившись лучшим пониманием того, как эти объекты возникают и проявляют себя, мы начали рыться в предыдущих результатах моделирования гигантских столкновений, обнаруживая синестии и там тоже. Оказалось, что мы случайно делали синестии на протяжении нескольких лет. Более того, большинство ученых, работающих над столкновениями гигантских масштабов, не зная того, получали в данных своих моделей синестии, только и ждущие, чтобы их признали в качестве странных, новых объектов в науке.

Тот факт, что никто не заметил их ранее, был результатом неверных ожиданий. В диапазоне возможных грандиозных столкновений, приводящих к образованию Луны, энергия и момент импульса канонического соударения с небесным телом массой, примерно равной массе Марса, слишком малы, чтобы образовать синестию. Сфокусировав свое внимание на столкновении с телом массы Марса, все исследователи в этой области — несколько поколений ученых — были введены в заблуждение предположением, что планета и диск — стандартный итог грандиозных столкновений.

Для нас следующим очевидным шагом было моделирование с целью проверки того, как часто должны рождаться синестии в результате сложных процессов формирования планет. Мы разработали методику, позволяющую отобразить, какие столкновения могут превратить планеты в синестии. Сравнив эти результаты с моделями роста планет, мы нашли, что синестии — не невероятно

редкие и нетипичные объекты, а, как это ни странно, очень распространенное, но мимолетное явление в молодых планетных системах. Более того, результаты нашего моделирования дают основания предполагать, что большая часть каменных планет, возможно, трансформировались в синестии один или несколько раз в период своего формирования. Сейчас мы считаем, что в результате большей части гигантских столкновений, формировавших небесное тело с массой, примерно равной массе Земли, также образовывалась синестия. В мгновение ока мы открыли недостающее звено в космической истории планет.

Назад к Луне

И все же остается мотивирующий вопрос: может ли синестия объяснить уникальное родство нашей Луны с Землей? Синестия — это принципиально отличная среда для процесса лунной аккреции, нежели традиционный околопланетный диск. Мы обнаружили, что формирование Луны из синестии дает ответы на многие из вопросов, встающие перед моделью масштабного столкновения как объяснением рождения Луны.

Температура поверхности синестии определяется точкой кипения скальной породы, которая составляет примерно 2300°C при низком давлении на ее внешнем крае. Там охлаждающийся за счет излучения тепла в космос пар скальных пород, вероятно, конденсировался в капли магмы, которые дождем сыпались внутрь синестии. Интенсивность дождя из магмы, должно быть, раз в десять превышала самый сильный ливень из когда-либо отмеченных на Земле. При таком сценарии Луна зарождалась как небольшое небесное тело из расплавленных камней и металла — части того материала, который не испарился при первоначальном столкновении. Карлик по сравнению с огромной синестией, рождавшаяся Луна, по сути, летала внутри горячих глубин синестии в окружении огромного количества минерального пара под большим давлением, увеличиваясь в размерах с каждой поглощенной ею каплей дождя из магмы. Охлаждаясь, синестия быстро уменьшалась в размерах, так что спустя несколько десятков лет она должна была съежиться настолько, что ее внешний край отступил внутрь орбиты Луны. В этот момент и возникла Луна, рожденная умирающей синестией.

Эта история, возможно, объясняет, почему Земля и Луна стали близнецами по составу изотопов. Дело в том, что синестия

образовалась из испарившегося и хорошо перемешанного вещества двух столкнувшихся небесных тел. Более того, проливные дожди магмы в синестии и турбулентные вихри паров должны были обеспечить даже еще более сильное перемешивание в значительной части этого небесного тела. Если бы синестия была перемешана достаточно хорошо, Луна получила бы в точности такой же изотопный состав, как и Земля.

Синестия может также объяснить другие загадки Луны, которые не объясняет каноническая теория грандиозного столкновения. Например, хотя Луна имеет одинаковые с Землей следы изотопов, у нее не в точности такой же химический состав. На Луне более низкое по сравнению с Землей содержание высоколетучих элементов, таких как водород и азот, и умеренно летучих элементов, таких как натрий и калий. Эти специфические черты нельзя целиком объяснить в рамках канонической гипотезы. Однако они естественным образом вытекают из того, что растущая Луна «выпекалась» при температуре в несколько тысяч градусов в «жаровне» синестии.

Более летучие элементы должны были преимущественно оставаться в парах синестии, поэтому Луна не получила такого же, как и Земля, количества этих элементов. Летучие элементы, которые оставались в парах, были унесены внутрь при сжатии синестии, чтобы стать частью Земли. С помощью наших коллег Миши Петаева и Штейна Якобсена (Stein Jacobsen), оба из Гарвардского университета, мы показали, что характер и содержание умеренно летучих лунных элементов можно объяснить тем, что Луна пришла в химическое равновесие с парами элементов внутри синестии. Проще говоря, то, что Луна родилась внутри синестии, естественным образом объясняет, почему она имеет схожий с Землей химический состав, но более низкое содержание летучих элементов. Наш простой рецепт приготовления химического состава Луны таков: доведите до парообразного состояния два больших столкнувшихся небесных тела, хорошо их перемешайте и выпекайте при температуре 4000°C в конвекционной духовке в течение 10–100 лет.

Наконец, синестии могут объяснить загадочные причуды орбиты Луны. Странно, но Луна не обращается вокруг Земли в той же плоскости, что и Земля вокруг Солнца, которая называется плоскостью эклиптики. Вместо этого орбита Луны наклонена к плоскости эклиптики под углом примерно пять градусов. Именно благодаря наклону оси

орбиты у нас полное лунное затмение происходит не каждый месяц, а лишь в редких случаях, когда Земля, Луна и Солнце выстраиваются вдоль прямой линии. Однако после гигантского столкновения, если бы Луна образовалась из околопланетного диска или из синестии, естественно было бы ожидать, что она должна обращаться в плоскости эклиптики. Так почему же орбита Луны наклонена?

Новая модель того, каким образом орбита Луны изменяется со временем, разработанная теоретиком Института SETI Матией Чуком (Matija Čuk) с коллегами, может объяснить как наклон орбиты Луны, так и продолжительность земных суток. Грандиозный удар, вероятно, пришелся в бок Протоземле, в результате чего образовалась синестия с осью вращения, лежащей недалеко от плоскости эклиптики. Луна формировалась в плоскости экватора Земли, поэтому ее орбита также оказалась далеко от эклиптики. Со временем резонансное взаимодействие с Солнцем повернуло ось вращения Земли в более «вертикальное» положение, ближе к нынешнему наклону в 23° . В результате скорость вращения Земли уменьшилась, и наша планета слегка отодвинулась от Солнца, чтобы сохранить момент импульса. По мере того как Луна теряла энергию своего орбитального движения, вызывая приливы и отливы на Земле, она медленно удалялась от нашей планеты, уменьшая наклон своей орбиты к плоскости эклиптики до нынешнего значения. Таким образом, одно гигантское столкновение, в результате которого образовалась синестия с наклоненной осью вращения, возможно, объясняет множество ключевых динамических характеристик Земли и ее спутника.

Таким образом, естественное изящество синестии и ее объяснительная сила спасли гипотезу столкновения гигантских масштабов и навсегда изменили подход к изучению происхождения Луны.

Реализация наследия программы «Аполлон»

Не имея данных, полученных при изучении камней, собранных астронавтами «Аполлона», мы были бы удовлетворены неполной или даже ошибочной идеей того, как образовалась Луна. Трудная задача по объяснению этих данных привела к открытию синестий. Сегодня наша новая трудная задача — глубже понять природу синестий и их роль в формировании планет. Мы пока лишь в начале этого квеста.

Нашу модель формирующей Луну синестии можно проверить, улучшив точность ее предсказаний химического и изотопного состава вещества Луны. Мы все еще получаем новые данные из образцов, собранных экспедициями «Аполлонов», — полстолетия прогресса в создании приборов позволяет получить более точные и более подробные данные. Но образцы, доставленные «Аполлонами», — ограниченный ресурс, имеющий большие проблемы в доступности и полноте. Более, чем когда-либо, нам необходимы образцы породы лунной мантии, чтобы построить уточненные химические модели состава Луны в целом. Возвращение на Луну для получения образцов мантии, куски которой должны быть обнажены внутри и вокруг крупных ударных кратеров, позволит нам продвинуться в построении таких моделей. Между тем горные породы, находящиеся здесь, на Земле, возможно, дадут дополнительные важные ключи к пониманию происхождения Луны. Недавно стало понятно, что самые глубокие области земной мантии содержат следы вещества, пережившего гигантское столкновение, которое породило Луну. Какой бы процесс ни привел к формированию Луны, он не смог бы стереть эти химические следы. Комбинируя данные с Земли и Луны, мы надеемся собрать воедино наши взгляды на синестию, которая сотворила оба небесных тела.

Помощь в понимании синестий, вероятно, придет также извне нашей Солнечной системы. До сих пор мы видели их только как математические объекты на экранах наших компьютеров, но, возможно, синестии больше не остаются чисто теоретическими понятиями. Множество телескопов в космосе и на Земле вглядываются в небеса в поисках экзопланет, силуэт которых просматривается на фоне ярких ликом их солнц. Поскольку форма синестий очень сильно отличается от сферических планет, они должны отбрасывать необычную тень на наши телескопы. Другие новые и зарождающиеся источники данных — младенческие фотографии планет вокруг очень молодых звезд, которые, скорее всего, все еще находятся в стадии формирования планет при гигантских столкновениях. Как знать, вдруг некоторые из этих фотографий откроют тучные сияющие пончики паров горных пород там, где когда-то была планета? Может быть, вскоре нам удастся мельком взглянуть на первую естественную синестию и стать свидетелями такого же соиздательного разрушения, как то, что привело когда-то к формированию нашей Земли и Луны. ■

ЩЕДРЫЙ ДАР «АПОЛЛОНА»

ЛУННЫЕ КАМНИ,
ДОСТАВЛЕННЫЕ ДОМОЙ
АСТРОНАВТАМИ
«АПОЛЛОНА», ПЕРЕКРОИЛИ
НАШИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ
О ЛУНЕ И ВСЕЙ СОЛНЕЧНОЙ
СИСТЕМЕ. ПОПОЛНЕНИЕ
ЭТОЙ КОЛЛЕКЦИИ – ОДНА
ИЗ САМЫХ ВАЖНЫХ ПРИЧИН
ВЕРНУТЬСЯ ТУДА

Эрика Джаун

В Космическом центре NASA
им. Линдона Джонсона внутри тефлоно-
вого мешка в заполненном азотом шкафу
хранилища образцов, доставленных
«Аполлонами», находится самая большая
из оставшихся частей образца лунной
породы № 15556 экспедиции «Аполлон-15»

«Аполлон-11»

1969

50
лет

2019

Юбилей



Лунные экспедиции «Аполлонов» более всего знамениты тем, что оставили на Луне следы человека, но их главным вкладом в науку стала коллекция камней, которые астронавты привезли домой. Назвать эти 382 кг камней и реголита (тонкого слоя измельченных горных пород и пыли, который покрывает поверхность Луны и других планетных тел) драгоценным кладом будет не вполне справедливо. Они — больше чем клад: изучение этих образцов в лабораториях на Земле помогло заложить новую область науки о планетах и дало нам принципиальное понимание геологических процессов, которые идут на всех небесных телах планетарного масштаба.

Я родилась слишком поздно, чтобы своими глазами увидеть «Аполлон-11», но моя жизнь и моя карьера как ученого-планетолога в буквальном смысле формировались благодаря образцам, доставленным на Землю шестью экспедициями, побывавшими на Луне. Например, некоторые мои исследования касаются вулканических отложений, выброшенных извержением на лунную поверхность. Данные, которые я использовала, получены из образцов, взятых непосредственно с поверхности астронавтами во время экспедиций «Аполлон-15» и «Аполлон-17». Другие данные были собраны орбитальным

зондом, который ученые построили и отправили к Луне как непосредственный результат научно-технических знаний, добытых в ходе экспедиций программы «Аполлон».

Согласно Райану Цайглеру (Ryan Zeigler), хранителю образцов, добытых в ходе программы NASA «Аполлон», за прошедшие 50 лет NASA получило 3190 запросов на уникальные образцы лунных пород от более чем 500 ученых в 15 странах. За несколько десятилетий, говорит Цайглер, агентство распределило 50 тыс. уникальных образцов лунного грунта, и в настоящее время 145 ученых,



ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Образцы лунного грунта, собранные астронавтами «Аполлонов», оказали глубокое влияние на науку о планетах.
- Анализируя их в лабораториях на Земле, ученые прояснили темные пятна, касающиеся происхождения Луны и эволюции Солнечной системы.
- Новые образцы с различных частей Луны, возможно, расскажут нам намного больше.



Пять образцов, собранных во время экспедиций 15-го, 16-го и 17-го «Аполлонов» (1), а также образец 15415 (2) с «Аполлона-15», названный «Камнем бытия», который помог ученым разработать ведущую теорию происхождения Луны

ОБ АВТОРЕ

Эрика Джауин (Erica Jawin) — геолог-исследователь, научный сотрудник Национального музея естественной истории при Смитсоновском институте.



работающих в различных областях науки, включая астрономию, биологию, химию, машиностроение, материаловедение, медицину и геологию, изучают более 8 тыс. образцов. А самое главное — лунные камни совершили революцию в нашем понимании трех основных вопросов: о природе лунной поверхности, о происхождении Луны и об эволюции Солнечной системы.

Древняя поверхность

До того как мы послали космический аппарат и людей на Луну, наши знания о естественном спутнике Земли в основном были спекулятивными, ограниченными наблюдениями, которые можно было сделать с Земли.

Эти исследования говорили, что поверхность Луны чрезвычайно стара, поскольку она усыпана кратерами от метеоритов, которые падали там на протяжении, должно быть, миллиардов лет. Когда мы наконец достигли Луны, мы в этом убедились. После того как образцы лунных пород прибыли на Землю, геохимики проанализировали состав их изотопов, которые со временем распадаются по хорошо известным законам, и обнаружили, что образцы лунных пород старше, чем большинство горных пород на Земле: их возраст — от 3 до 4,5 млрд лет.

Ученые-планетологи тогда нашли связь, повлиявшую практически на все последующие исследования Луны и других небесных тел планетного масштаба: они сравнили впервые измеренный возраст образцов лунного грунта, доставленных с места посадки «Аполлона-11», с числом метеоритных кратеров в районе, где каждый из них был подобран. Затем они использовали эту информацию, чтобы разработать модель того, как часто метеоритные кратеры возникают на поверхности Луны. Благодаря этой модели место, где были собраны образцы, доставленные «Аполлоном», служит чем-то вроде Розеттского камня,

позволяющего ученым оценить возраст пород в любом местоположении на Луне (и даже других небесных телах планетного масштаба), не посещая их.

Самый древний образец, примерно 4,5 млрд лет от роду — по сути, ровесник самой Луны. Большинству горных пород на Земле намного меньше 4 млрд лет из-за постоянной рециркуляции коры в результате тектоники плит — процесса, который на Луне не происходит. Таким образом, лунные образцы дают важный беглый взгляд на древние горные породы времени зарождения Солнечной системы. Они, возможно, расскажут нам о молодой Земле. В марте этого года ученые, анализирующие брекчию (горная порода, состоящая из сцементированных воедино обломков других пород) с «Аполлона-14», определили, что, возможно, один из ее фрагментов вообще не лунного происхождения. На самом деле он, вероятно, представляет собой первый земной метеорит — камень, который был выброшен с Земли 4 млрд лет назад и попал на Луну. Спустя несколько миллиардов лет астронавт Алан Шепард поднял его и вернул домой.

Гипотезы о происхождении Луны

До полетов «Аполлонов» ученых было несколько конкурирующих гипотез того, как образовались Луна и спутники других планет. Возможно, Земля захватила другое небесное тело, которое пролетало слишком близко. А может быть, в свои юные годы наша планета вращалась настолько быстро, что сгусток с ее поверхности оторвался от ее тела. Или же Земля и Луна сформировались одновременно из исходного «протопланетного диска», который дал начало всем планетам нашей Солнечной системы. Однако после экспедиций «Аполлона» мы получили совершенно иную картину.

Сегодня теория происхождения Луны, получившая наибольшую поддержку, —

это так называемая гипотеза гигантского столкновения. Идея основана на доказательствах, собранных в рамках программы «Аполлон», и состоит в том, что около 4,5 млрд лет назад небесное тело размером примерно с Марс (которое называют Тея) столкнулось с Землей, распавшись на фрагменты и выбросив часть коры и мантии Земли в космос. В результате выброшенное вещество Земли смешалось с остатками Теи, собравшись в спутник, который остыл и превратился в Луну.

Эта модель была построена на основании многих наблюдений образцов, доставленных экспедициями «Аполлон» и экспериментами на поверхности, включающими следующие аспекты.

ЖЕЛЕЗО. На Луне удивительно мало железа. Эксперименты по геофизике поверхности, развернутые экспедициями «Аполлон», показали, что по сравнению с планетами земной группы ядро Луны занимает очень маленькую долю ее объема по сравнению с планетами земной группы — всего 25% ее полного радиуса. Относительное отсутствие железа, на что указывает малый размер ядра Луны, служит доказательством того, что, когда произошло гигантское столкновение, на Земле уже сформировалась богатая железом центральная часть и Луне досталось мало железа.

СУХОСТЬ. Образцы лунного грунта оказались чрезвычайно сухими, почти полностью лишенными летучих элементов — атомов или молекул с низкой температурой кипения, которые легко испаряются, таких как вода, двуокись углерода, азот и водород. Чтобы объяснить это истощение, ученые предположили, что огромные энергия и тепло, образовавшиеся при гигантском столкновении, вероятно, вынесли летучие вещества с фрагментов Протолуны.

ОКЕАН МАГМЫ. Одна из самых влиятельных гипотез, родившаяся на основе изучения образцов лунного грунта, — идея, что на ранней Луне был океан магмы. Образцы, доставленные «Аполлоном-11», показали, что лунные возвышенности (яркие высокие области в противоположность темным лунным морям на низко расположенных участках) содержат высокую концентрацию

минерала плагиоклаза. Структура пород, содержащих этот минерал, дает основания предполагать, что он образовался из остывшего большого куска расплавленной горной породы, а легкие кристаллы плагиоклаза всплыли наверх. Поскольку аналогичные породы были найдены предыдущими экспедициями роботов в других местах, а лунные возвышенности широко распределены, слой магмы, должно быть, покрывает большую часть поверхности Луны, если не всю ее. Две независимые группы ученых высказали идею такого океана магмы раннего периода в 1970 г., спустя всего шесть месяцев после доставки «Аполлоном» первых образцов. Несколько дополнительных линий доказательств из области геохимии и геофизики свидетельствуют в пользу модели океана магмы, которая сегодня все еще находится в стадии разработки.

В этом году будут открыты хранилища образцов, которые оставались закрытыми с момента, когда те были собраны почти 50 лет назад

Одно из доказательств, которое усиливает построение модели гигантского столкновения, — содержание различных изотопов (атомов элемента, имеющих массу, отличающуюся от массы «обычных» атомов) в образцах, доставленных «Аполлоном». Используя процесс, называемый лазерным фторированием, в 2001 и 2012 гг. ученые обнаружили, что содержание изотопов кислорода и титана на Луне и на Земле почти одинаково. Если Луна образовалась из смеси материала Теи и Земли, почему ее изотопный состав подобен земному? Это свидетельство породило на свет новые идеи, такие как модель синестии, которую ученые-планетологи Саймон Локк и Сара Стюарт описывают в статье «История происхождения».

История Солнечной системы

Изучение лунных образцов рассказало нам и о других небесных телах планетного масштаба. Возможно, самый важный результат — это модель эволюции



Кураторы хранилища переносят образцы с «Аполлона-15» из воздушного шлюза в шкаф из нержавеющей стали

Солнечной системы «Ницца» (названная так потому, что была создана во французской Ницце). Согласно этой модели, планеты-гиганты внешней части Солнечной системы первоначально сформировались ближе друг к другу. Спустя несколько сотен миллионов лет их орбиты стали нестабильными, что вызвало быстрое перемещение Сатурна, Урана и Нептуна к их нынешним орбитам, которые намного дальше от Солнца. Перемещение планет-гигантов затянуло материал из внешней части Солнечной системы — пояса Койпера — во внутреннюю, где эти объекты сталкивались с планетами и их спутниками, вызывая в Солнечной системе всеобщий хаос.

Модель, возможно, покажется притянутой за уши, но она изящно объясняет несколько кажущихся не связанными друг с другом наблюдений в нашем космическом окружении. Например, проведя датировку образцов, доставленных

«Аполлонами», и проанализировав метеоритные кратеры, ученые пришли к выводу, что примерно через 700 млн лет после формирования планет случился всплеск количества упавших на Луну метеоритов катастрофического масштаба, получивший название «поздняя массивированная бомбардировка». Первоначально не было никаких разумных объяснений, почему внезапно в это время резко подскочило число метеоритов. Однако хаотический период метеоритных дождей, предсказанный моделью «Ницца», дает ответ на вопрос об источнике бомбардирующей поверхность частиц, по времени точно совпадающем с упомянутой эрой.

Помимо рассказа об эволюции Солнечной системы, образцы лунных пород также позволили ученым исследовать химическую эволюцию поверхностей планет. «Космическое выветривание» — процесс, который описывает физическую

и химическую эрозию на небесных телах, лишенных атмосферы. Изучение образцов почвы, взятых с поверхности Луны астронавтами «Аполлона», показало, что они содержат агглютинаты, сплавленные частицы стекла и минералов, образовавшиеся при столкновении микроскопических пылинок. Эти агглютинаты со временем накапливаются и могут составлять 60–70% готовых образцов реголита. Крошечные шарики чистого железа, называемые нанофазным железом, также образованы космическим выветриванием и накапливаются на наружных частях корки определенных видов почвы, вызывая со временем потемнение поверхности. Теперь мы знаем, что солнечное излучение, большие изменения температуры и постоянная бомбардировка крошечными метеоритами — лишь некоторые причины космического выветривания.

Образцы для будущего

Наступает удивительное время для науки о Луне: в этом году будут открыты хранилища образцов, которые оставались закрытыми с момента, когда они были собраны почти 50 лет назад на нашем естественном спутнике. Когда образцы породы были собраны, NASA намеренно оставило часть их запечатанными, чтобы дождаться появления методов, позволяющих выйти за пределы возможностей эры «Аполлона». В марте в рамках программы ANGSA («Анализ образцов «Аполлона» методами следующего поколения») были выбраны девять научно-исследовательских групп, которые получают нетронутые запечатанные с помощью вакуумной упаковки образцы, доставленные 15-м, 16-м и 17-м «Аполлонами». Возможность исследовать «новые» лунные образцы, вероятно, приведет к новым фундаментальным открытиям, которые расскажут о том, как образовался и эволюционировал наш естественный спутник.

Как бы много мы ни узнали, изучая образцы, доставленные «Аполлонами», и сигналы с оставленного ими на поверхности Луны оборудования, сколько мы еще, несомненно, ни узнаем, изучая образцы из новых хранилищ, нам очень нужны новые экземпляры. Например, мы не исследовали еще образцы с обратной стороны Луны, из полярных областей, или находящиеся глубоко под

поверхностью. Два образца, которые я очень хотела бы получить, — это порода из Бассейна Южный полюс — Эйткен (на обратной стороне Луны) и лед из полярного кратера. Бассейн Южный полюс — Эйткен известен как самый большой из разведанных метеоритных кратеров на Луне (и один из самых крупных в Солнечной системе), а внутри него могут содержаться породы из нижнего слоя коры и даже из мантии. Изучение Бассейна Южный полюс — Эйткен поможет нам также понять, как необычайно большие кратеры формируют поверхность и внутреннюю структуру планет. Получение же образца льда с полюса Луны, возможно, расскажет нам о возрасте и происхождении лунной воды — что, в свою очередь, по-видимому, прояснит вопрос, откуда взялась вода на Земле.

Экземпляры из этого списка пожеланий могли бы быть доставлены пилотируемыми экспедициями или с помощью космических роботов: среди ученых-планетологов нет единодушного мнения, что лучше. Многие специалисты справедливо утверждают, что автоматические станции-роботы дешевле, безопаснее и могут работать дольше, чем экспедиции с людьми. С другой стороны, люди с большей вероятностью, чем роботы, соберут более широкий спектр необычных образцов, о чем свидетельствуют разнообразные коллекции, доставленной «Аполлонами» (породы, собранные ковшем, и просеянные образцы грунта, осколки крупных камней, буровые керны), количество и геология образцов (состав, тип породы, возраст).

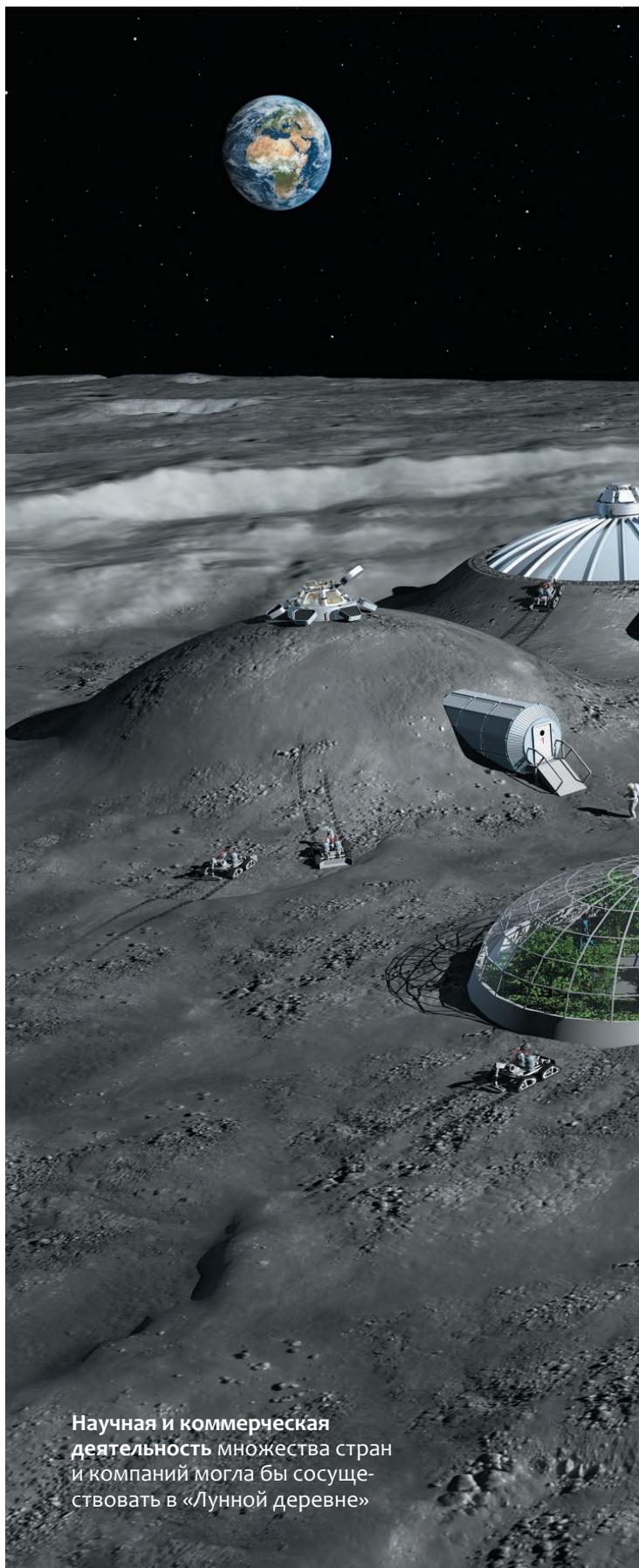
Экспедиции «Аполлонов» представляют собой исключительное достижение, которое изменило наши взгляды на Солнечную систему. В то время как мы торжественно отмечаем 50-летний юбилей гигантского прыжка человечества, ни один из людей не ступал на другое небесное тело с тех пор, как Харрисон «Джек» Шмитт и покойный Джин Сернан покинули поверхность Луны 14 декабря 1972 г. Как ученый, глубоко вдохновленный этими экспедициями, я активно работаю над созданием движения «Аполлон» моего поколения. Я хочу увидеть, как люди всех цветов кожи и гендеров высадутся на поверхности Луны, заряженные мастерством, настойчивостью и желанием исследовать неизвестное. ■



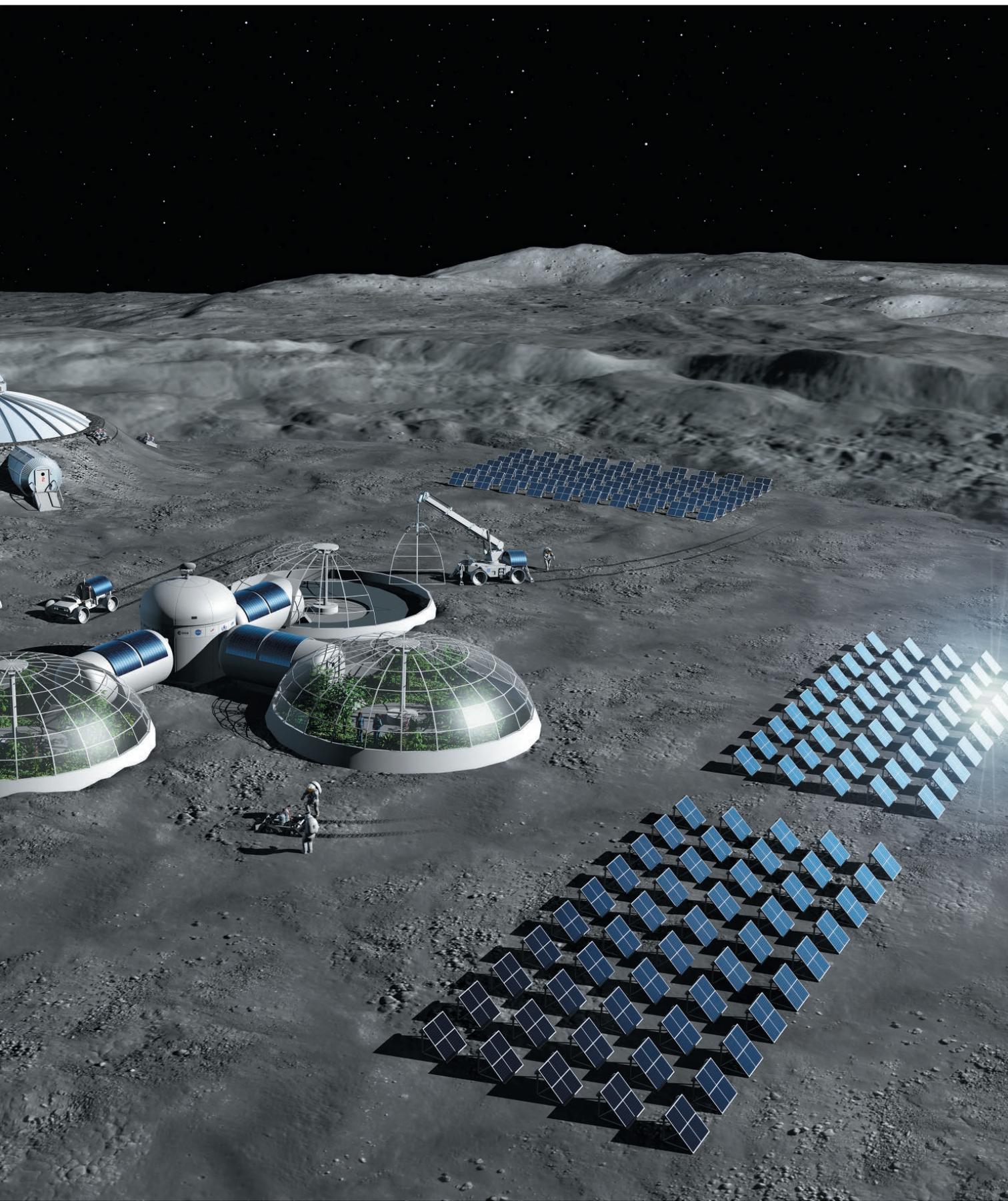
ПРИШЕЛ ОДИН – ПРИДУТ ВСЕ

В ПЕРВЫЙ РАЗ ЧЕЛОВЕЧЕСТВО
ПОБЫВАЛО НА ЛУНЕ,
ЧТОБЫ ДОКАЗАТЬ, ЧТО ЭТО
РЕАЛЬНО. ПРИШЛО ВРЕМЯ
ЗАБЫТЬ О СОПЕРНИЧЕСТВЕ
И СОВМЕСТНО ЭНЕРГИЧНО
ВЗЯТЬСЯ ЗА ДЕЛО

Клара Московиц



Научная и коммерческая
деятельность множества стран
и компаний могла бы сосуще-
ствовать в «Лунной деревне»





Генеральный директор Европейского космического агентства (ЕКА) **Иоганн-Дитрих Вернер**

Не будь холодной войны, «Аполлон-11» так никогда бы и не взлетел. Сильное желание победить Советы в лунной гонке и доказать техническое превосходство США побудило американский конгресс выделить NASA 4,5% национального бюджета в разгар пика космической гонки в 1966 г. Однако после первой высадки на Луне, состоявшейся три года спустя, агентство уже никогда не получало свыше 2% бюджета и довольствуется примерно половиной процента после 2010 г.

В наше время национальный престиж — недостаточная побудительная причина для большинства стран, чтобы в одиночку отправиться в космос. Если мы собираемся снова лететь к другому небесному телу, нужно делать это сообща. Эта идея, пожалуй, наиболее ясно была выражена Иоганном-Дитрихом («Яном») Вернером (Johann-Dietrich "Jan" Wörner), генеральным директором Европейского космического агентства (ЕКА). В 2015 г. Вернер представил свое видение «Лунной деревни» — что-то вроде совместного «палаточного лагеря» на лунной поверхности. Страны, частные компании, университеты, некоммерческие организации и отдельные лица приглашаются принять участие, чтобы послать людей и роботов для выполнения всевозможных научных, геологоразведочных и коммерческих задач. А чтобы поддержать международное реноме, демонстрируя искренность намерений, проект «Лунной деревни» официально организован не ЕКА, а базирующейся в Вене неправительственной организацией, называемой *Moon Village Association*, которая открыта для вступления в нее групп и отдельных лиц. Наш корреспондент побеседовал с Вернером о целях проекта «Лунная деревня», обсудив вопросы выбора Луны или Марса, а также почему сейчас подходящее время лететь.

— **Расскажите о ваших планах возвращения на Луну.**

— Мы не хотим возвращаться на Луну.

— **Что вы имеете в виду?**

— Мы хотим лететь вперед на Луну. Я говорю серьезно. Мы не стремимся к космической гонке с целью престижа. Луна — прекрасное место



Долговременные колонии на Луне, вероятно, потребуют жилищ, защищенных от радиации, а также куполов для выращивания зерновых культур и луноходов для транспортировки



для истинного сотрудничества в международном масштабе. В прошлом космическая деятельность реализовывалась путем прямых контрактов агентств, как в случае лунных экспедиций программы «Аполлон». У нас в ЕКА уже есть аналогичные проекты. У нас есть и проекты, в которых агентство — посредник, помощник, куратор. Это проект «Лунная деревня».

«Лунная деревня» — это открытая концепция с участием многих сторон. Все до единого слова в этой фразе важны. «С участием многих сторон» означает, что партнер может быть не один — их должно быть как можно больше. «Открытая» означает, что нет никаких формальных требований, чтобы стать ее партнером. И это «концепция», а не один проект. Различные партнеры должны выбрать, что они хотели бы реализовать, будет ли это транспортировка или же добыча полезных ископаемых, или туризм, или научная работа, или разработка техники для использования ресурсов на месте — например, воды на Луне для производства топлива. Она полностью открыта для различных целей.

— **Рассматриваете ли вы «Лунную деревню» в качестве наследия программы «Аполлон» или преднамеренного от нее отхода?**

— Программа «Аполлон» проводилась в совершенно другой обстановке. Тогда движущей силой было соперничество. Сегодня, я полагаю, движущая сила — сотрудничество. Но, конечно, без «Аполлона» мы, скорее всего, даже не мыслили бы об этом.

— **Вы наблюдали посадку «Аполлона-11»? Как она на вас повлияла?**

— Да. Мне было тогда 15 лет. В Германии, дело происходило ночью, и я совсем не спал. Очень хорошо помню: я смотрел телевизор и наблюдал первые шаги Нила Армстронга и Базза Олдрина. Передача закончилась, и я вышел из дома на свежий воздух. Я глубоко дышал и думал: «Мы творим будущее». Это действительно было для меня знаменательным днем. В то время я не мог предполагать, что стану участником работы по освоению космоса. Сейчас я генеральный директор ЕКА.

— **Почему вы нацелились на Луну, а, скажем, не на новую цель, такую как Марс?**

— Я за то, чтобы подумать также и о Марсе, но я считаю, что Луна — правильный путь, чтобы идти вперед. Мы сегодня не можем говорить о пилотируемой экспедиции на поверхность Марса из-за [опасности] радиации и других сложных проблем. Можем ли мы осмелиться послать людей в полет на два года в условиях, когда выжить по-настоящему трудно, а если они заболеют, у нас не будет никакого способа вернуть их домой? Нам нужно разработать более совершенную технику.

А вот Луна — подходящая площадка для развития техники. Например, мы можем использовать ресурсы, имеющиеся на поверхности Луны, чтобы возвести сооружения для защиты астронавтов,

построить обсерватории или производить топливо: водород и кислород. По этой причине Луна — плацдарм для того, чтобы идти дальше — на Марс. Но это отдаленное будущее — потребуются десятилетия. Даже несмотря на то что кое-кто собирается достичь цели в более короткие сроки, мы увидим, что это невозможно.

— **Прошло 50 лет с полета «Аполлона-11». Почему потребовалось так много лет, чтобы послать астронавтов назад?**

— Вперед.

— **Извините, конечно, вперед. Но почему вы полагаете, что сейчас подходящее время?**

— Я замечаю во всем мире готовность работать совместно. Я проводил беседы с китайцами, с американцами, с японцами, с русскими, и все они рассчитывают на совместную работу в деле исследования Луны, Марса и других объектов.

Я надеюсь, что будет не так, как в прежние времена: рвануть на Запад и застолбить участок. Я надеюсь, что у нас на Луне не будет заборов. В Германии у нас уже был опыт строительства заборов и стен. Я надеюсь, все будет сделано гораздо лучше.

— **Что вы видите в качестве самого большого препятствия для успешной реализации «Лунной деревни»?**

— Это бумага, вроде той, которую вы можете потрогать руками, где, по-моему, на одной из сторон изображен Джордж Вашингтон. (Смеется.) Итак, деньги.

— **Если бы мы стартовали к «Лунной деревне» сегодня, вы бы полетели?**

— У меня сегодня назначен деловой обед, но я пропустил бы его, если бы кто-нибудь сказал, что я могу лететь прямо сейчас. Да, я позвонил бы своей семье и полетел бы — полетел бы немедленно. Я любознательный человек, и обычно любопытство двигает моими поступками. Но я полетел бы, лишь имея обратный билет. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Forming a Moon with an Earth-like Composition via a Giant Impact. Robin M. Canup in Science, Vol. 338, pages 1052–1055; November 23, 2012.
- Tidal Evolution of the Moon from a High-Obliquity, High-Angular-Momentum Earth. Matija Čuk et al. in Nature, Vol. 539, pages 402–406; November 17, 2016.
- The Origin of the Moon within a Terrestrial Synestia. Simon J. Lock et al. in JGR Planets, Vol. 123, No. 4, pages 910–951; April 2018. Apollo Next Generation Sample Analysis Program: <https://sservi.nasa.gov/articles/apollo-next-generation-sample-analysis-program>
- Moon Village Association: <https://moonvillageassociation.org>
- Transcripts from Apollo11: www.hq.nasa.gov/alsj/a11/a11trans.html

Senior Vice President and Editor in Chief:

Mariette DiChristina

Executive Editor:

Fred Guterl

Design Director:

Michael Mrak

Managing Editor:

Ricki L. Rusting

Digital Content Manager:

Curtis Brainard

News Editor:

Dean Visser

Opinion Editor:

Michael D. Lemonick

Senior Editors:

Eliene Augenbraun, Christine Gorman, Steve Mirsky,
Clara Moskowitz, Debbie Ponchner, Claudia Wallis, Kate Wong,

Associate Editors:

Sunya Bhutta, Lee Billings, Andrea Gawrylewsk, Larry
Greenemeier, Dina Fine Maron, Annie Sneed, Amber Williams

Contributing editors: David Biello, W. Wayt Gibbs, Ferris Jabr, Anna Kuchment,
Robin Lloyd, George Musser, Christie Nicholson, John Rennie

Art Contributors: Edward Bell, Bryan Christie, Lawrence R. Gendron, Nick Higgins

Art director:

Jason Mischka

Senior Graphics Editor:

Jen Christiansen

President:

Dean Sanderson

Executive Vice President:

Michael Florek

Executive Vice President,

Global Advertising and Sponsorship:

Jack Laschever

Publisher and Vice President:

Jeremy A. Abbate

© 2019 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

СПЕЦИАЛЬНЫЙ РЕПОРТАЖ: БУДУЩЕЕ АРКТИКИ

Арктические амбиции

Разные страны внезапно устроили гонку в целях установления контроля над дном океана и эксплуатации ресурсов быстро тающего Крайнего Севера.

Борьба с раком по Дарвину

Эволюция и естественный отбор открывают пути к разработке принципиально нового подхода к предотвращению рака и борьбе с ним.

Здоровое безумие

Обычные ракеты не донесут нас до звезд. Некоторые ученые пытаются расширить границы физики, чтобы найти то, что способно сделать это.

Проблема трех тел

Математики знают, что им никогда не удастся до конца решить задачу, история которой уже насчитывает столетия, однако попытка получить ответ на небольшую ее часть привела к нескольким интригующим открытиям.

Когда животные дерутся

Недавние исследования опровергают представление, что способность оценивать боевые качества соперников свойственна едва ли не всем животным.



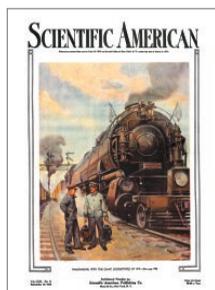


СЕНТЯБРЬ 1969

Беспокойная Луна. Сейсмометры, оставленные на Луне астронавтами, начали сообщать о толчках сразу же после установки. Первые сигналы исходили от Армстронга и Олдрина, когда те ходили по поверхности, завершая свою работу. Был четко зарегистрирован

также взлет лунного модуля «Орел». Первая группа высокочастотных сигналов показала загадочной, но в конце концов их связали с моментами стравливания газа. Вторая группа сигналов, очевидно, представляет собой сотрясения, вызванные скатыванием камней по крутым склонам кратеров. Самый интересный класс сигналов, общим числом более 20, как предполагается, действительно имеет тектоническое происхождение.

Поливода. Существование стабильной полимерной формы воды со свойствами, сильно отличающимися от обычной, было подтверждено объединенной научной группой Национального бюро стандартов и Мэрилендского университета. О «новой» субстанции, которую назвали поливодой, впервые сообщили русские химики в начале 1960-х гг. Новые данные говорят о том, что поливода представляет собой стабильную полимерную цепочку из молекул обычной воды. В отличие от нормальной воды поливода сохраняет свою молекулярную структуру до температуры примерно 500° С. Но если она настолько стабильна, почему ее никогда не находили в природных условиях? **Примечание:** вскоре было выяснено, что поливода — это обычная вода, загрязненная органическими компонентами.

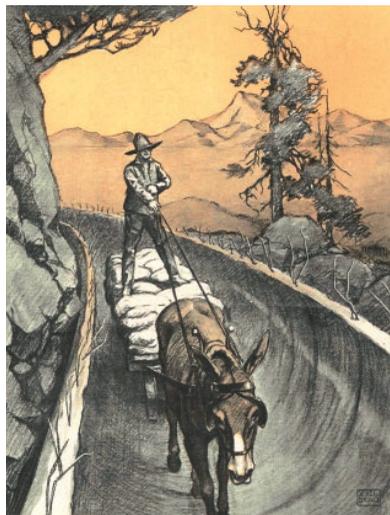


СЕНТЯБРЬ 1919

Мулы доставляют товары.

Титонский ирригационный канал в штате Вашингтон был построен Службой мелиорации Соединенных Штатов в 1907–1909 гг. и снабжал потребителей воды восемь лет. После недавнего расширения зоны орошения необходимо было увеличить пропускную способность канала. Для этого после демонтажа поперечных балок с каждой из его сторон были надстроены новые сегменты. Проблемой оставался вопрос доставки строительных материалов на места работ. В качестве шоссе пришлось использовать сам канал (на илл.). Мулы достаточно быстро перевезли большое количество грузов.

Мулы достаточно быстро перевезли большое количество грузов.



Мулы достаточно быстро перевезли большое количество грузов.

Мул везет строительные материалы по дну старого оросительного канала, проходящего модернизацию, 1919 г.

Авиационный хай-тек. Во время войны черный орех и красное дерево были практически единственными видами древесины для изготовления пропеллеров, и поскольку имеющихся запасов этих материалов в США было недостаточно для поддержания необходимого объема производства, на замену должны были прийти другие подходящие для этой цели породы дерева. Лаборатория лесных ресурсов США в Мадисоне, штат Висконсин, смогла предложить несколько местных пород. Для боевых самолетов было налажено производство пропеллеров из радиально распиленного белого дуба, а береза и клен использовались на учебных аэропланах.



СЕНТЯБРЬ 1869

Честная плата. В Париже было придумано нововведение с целью разрешения споров между пассажирами и извозчиками экипажей. Согласно имеющимся сообщениям, *compteur mécanique* (механическое вычислительное устройство) не только подсчитывает пройденное расстояние, но и показывает точную сумму стоимости поездки. На спинке сиденья извозчика закреплены два циферблата: один показывает время, другой — расстояние.

находясь в Париже, автор книги по геологии всегда был озадачен вопросом географического местоположения рая. Но наконец-то появился философ достаточно смелый, чтобы взяться устранить наши сомнения в этом вопросе: доктор медицины Д. Мортимер. Согласно его теории, «внутри фотосферы, окружающей божественный огонь, то есть Солнце, существует огромный шар или мир». Доктор Мортимер утверждает, что на него снизошло божественное откровение и он абсолютно убежден, «что эта сфера, открывшаяся ему таким образом, есть Царствие Небесное, в котором праведные души с Земли и находят свой вечный дом».

находясь в Париже, автор книги по геологии всегда был озадачен вопросом географического местоположения рая. Но наконец-то появился философ достаточно смелый, чтобы взяться устранить наши сомнения в этом вопросе: доктор медицины Д. Мортимер. Согласно его теории, «внутри фотосферы, окружающей божественный огонь, то есть Солнце, существует огромный шар или мир». Доктор Мортимер утверждает, что на него снизошло божественное откровение и он абсолютно убежден, «что эта сфера, открывшаяся ему таким образом, есть Царствие Небесное, в котором праведные души с Земли и находят свой вечный дом».



ПРАВИТЕЛЬСТВО
МОСКВЫ



МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ



МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
М.В.ЛОМОНОСОВА



РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК

ВСЕРОССИЙСКИЙ ФЕСТИВАЛЬ НАУКИ НАУКА +

МОСКВА 11-13 ОКТЯБРЯ

150
ЛЕТ



2019



IYPT

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ГОД
ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ
ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В РОССИИ



Copper (II) hydroxide precipitation
Photography: Wenting Zhu

ВХОД СВОБОДНЫЙ
FESTIVALNAUKI.RU

0+

 МГУ  ЦВК ЭКСПОЦЕНТР  РАН  ЗАРЯДЬЕ  МЦКО  90 ПЛОЩАДОК

МОСКОВСКИЙ
ЦЕНТР КАЧЕСТВА
ОБРАЗОВАНИЯ

ПО ГОРОДУ НА БАЗЕ ВУЗОВ,
МУЗЕЕВ, НАУЧНЫХ ЦЕНТРОВ,
ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ

РЕКЛАМА



СПЕЦРЕПОРТАЖ

50 лет

ЮБИЛЕЙ «АПОЛЛОНА-11»

ПРОШЛОЕ И БУДУЩЕЕ
ЧЕЛОВЕЧЕСТВА НА ЛУНЕ

В мире науки

www.sci-ru.org

8/9 2019

SCIENTIFIC
AMERICAN

Ежемесячный
научно-информационный
журнал

12+

СУТЬ РАБОТЫ МОЗГА

Нейронные
взаимодействия
порождают
мысль

ПЛЮС

«РУБЕЖИ
НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЗИКИ»

Ученые на Волге

НЕПОБЕДИМЫЕ КЛЕТКИ

Синтетические клетки,
невосприимчивые к атакам вирусов

ISSN 0208-0621



19008



9 770208 062001

