

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Ежемесячный
научно-информационный
журнал

www.sci-ru.org

8/9 2021

12+

БУДУЩЕЕ ФИЗИКИ ЧАСТИЦ // ВСЯ ПРАВДА О ВАКЦИНЕ «СПУТНИК V»

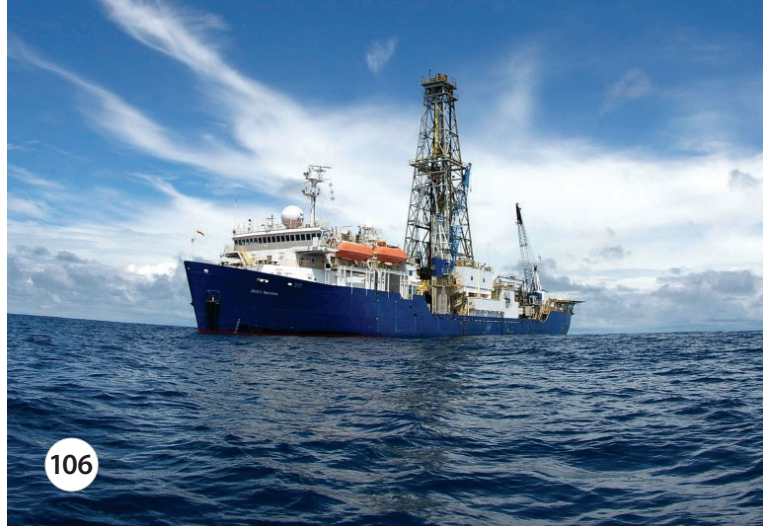
РОЛЬ ЖАЖДЫ В ЭВОЛЮЦИИ

Как наша потребность в воде стала
двигателем человеческой истории





4



106

Темы номера

БИОЛОГИЯ

Человек и жажда

Эшер Росингер

Вода всегда была важной движущей силой истории человечества

МЕДИЦИНА

Вирусы: в поисках компромисса

Наталья Лескова

Академик **Александр Гинцбург** отвечает на острые вопросы о созданной под его руководством вакцине «Спутник V»

ЮБИЛЕЙ

Генератор идей

Ольга Беленицкая

Президенту НИЦ «Курчатовский институт» члену-корреспонденту РАН **Михаилу Ковальчуку** исполняется 75 лет

СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

Две суперзвезды «Немчиновки»: о судьбе великих селекционеров уникального научного центра России

Владимир Губарев

Имена академиков **Николая Цицина** и **Баграта Сандухадзе** связаны с важными этапами истории легендарного научного центра, отмечающего свое 90-летие

4

МЕДИЦИНА

Сломанные гены: рак по наследству

40

Анастасия Пензина

Член-корреспондент РАН **Евгений Имянитов** — о внедрении методик молекулярно-генетического анализа в клиническую практику

12

ГЕОЛОГИЯ

Путешествие в докембрий

48

Янина Хужина

Каким было детство Земли? Отвечает член-корреспондент РАН **Антон Кузнецов**



20

МИНЕРАЛОГИЯ

Вести из царства минералов

58

Анастасия Пензина

Член-корреспондент РАН **Игорь Пеков** рассказывает о корнях и сегодняшней повестке древнейшей науки в мире



30

ИНФЕКЦИОННЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ

Царство убийц

66

Мэри Маккенна

Грибы, убивающие ежегодно 1,6 млн человек, становятся одними из самых смертоносных микроорганизмов — и мы не знаем, как остановить их нашествие



130



98



142

БИОХИМИЯ

Жизнь, новая и улучшенная

Роуэн Джейкобсен

Исследователи научились создавать искусственные белки, благодаря чему получена новая вакцина от COVID-19 и, возможно, произойдет революция в биологии

БИОЛОГИЯ

Выводок X прибыл

Кейт Вонг

Проведя 17 лет под землей, личинки Великого восточного выводка периодических цикад выбирают на свет

НЕЙРОБИОЛОГИЯ

Электрический мозг

Кристоф Кох

Воздействуя на мозг с помощью электродов, можно выявить расположение осознанных переживаний

МИКРОБИОЛОГИЯ

Настоящие живые ископаемые

Дженнифер Фрэйзер

После 100 млн лет, проведенных в донном осадке, микроорганизмы пробудились и стали размножаться

ПЛАНЕТОЛОГИЯ

Разбитый щит

Сара Скоулс

Ученые только что утратили один из своих лучших инструментов для защиты Земли от потенциально опасных астероидов. Что дальше?



48

ФИЗИКА

78 Новые способы сталкивать частицы 120

Чандрашекхар Джоши

Чтобы достичь новых пределов физики, нужно создать еще более мощные ускорители элементарных частиц

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

90 Диоксид углерода в горах Омана 130

Дуглас Фокс

Могут ли необычные выходы глубинных пород Земли решить мировую климатическую проблему?

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

98 Ковер альтернатив 142

Аиши Котхари

Для гармоничного сосуществования с биосферой потребуются построить взаимоотношения, сконцентрированные на поддержании жизни — как людей, так и других биологических видов

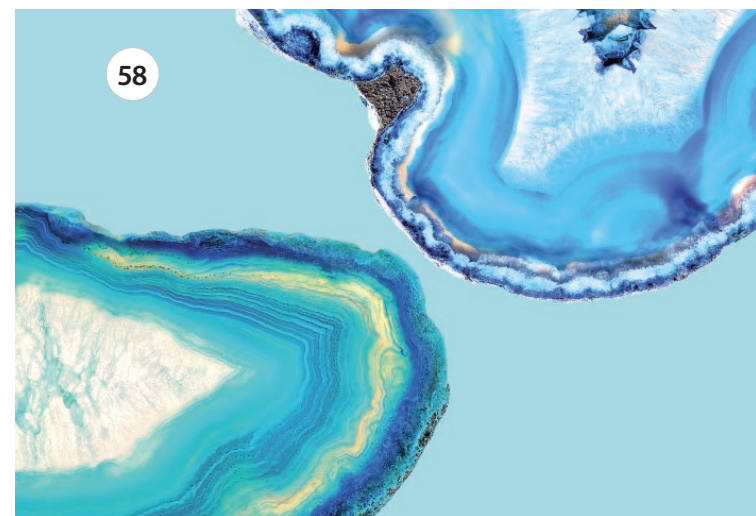
106 Как земля может спасти Землю 154

Джо Хандельсман

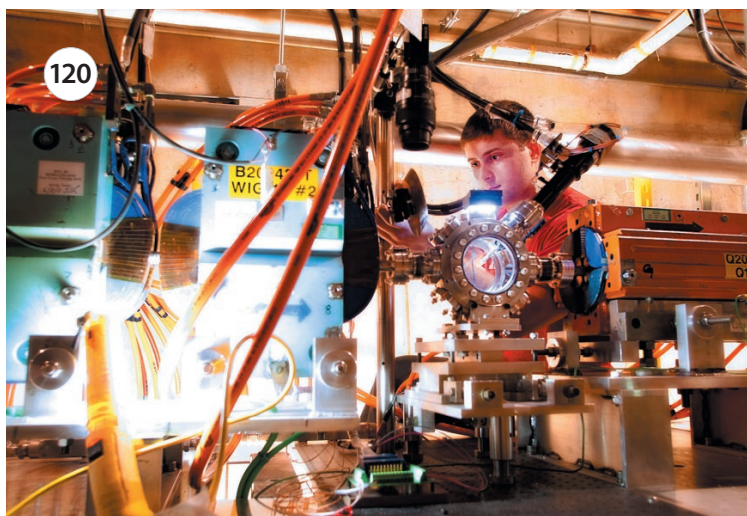
Методы ведения сельского хозяйства, способствующие сохранению углерода в почве, способны ограничить интенсивность эрозии и изменение климата

110 Разделы

От редакции 3
50, 100, 150 лет тому назад 105, 160



58



120

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Наши партнеры:



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



РОСАТОМ



Сибирское отделение РАН



очевидное
невероятное



ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛ

Научная Россия

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



Учредитель и издатель:

Некоммерческое партнерство «Международное партнерство
распространения научных знаний»

Главный редактор:

В.А. Садовничий

Главный научный консультант:

президент РАН акад. А.М. Сергеев

Ответственный секретарь:

О.Л. Беленицкая

Шеф-редактор иностранных материалов:

А.Ю. Мостинская

Выпускающий редактор иностранных материалов:

В.Д. Ардаматская

Зав. отделом российских материалов:

О.Л. Беленицкая

Выпускающий редактор:

М.А. Янушкевич

Обозреватели:

В.С. Губарев, В.Ю. Чумаков

Администратор редакции:

З.Х. Мусина

Научные консультанты:

акад. А.Л. Гинцбург; член-корр. РАН Е.Н. Имянитов; член-корр. РАН М.В. Ковальчук;
член-корр. РАН А.Б. Кузнецов; член-корр. РАН И.В. Пеков; акад. Б.И. Сандухадзе;
к.ф.-м.н. В.Г. Сурдин

Над номером работали:

М.С. Багоцкая, А.П. Кузнецов, Г.Ф. Куракин, С.М. Левензон, Н.Л. Лескова, А.И. Пензина,
А.И. Прокопенко, В.И. Сидорова, Я.Р. Хузина, Н.Н. Шафрановская, С.Э. Шафрановский,
А.В. Щеглов

Дизайнер:

Д.А. Гранков

Верстка:

А.Р. Гукасян

Корректур:

М.А. Янушкевич

Фотографы:

Н.Н. Малахин, Н.А. Мохначев

Директор НП «Международное партнерство распространения научных знаний»:

А.Ш. Геворгян

Заместитель директора НП «Международное партнерство распространения научных знаний»:

В.К. Малахина

Финансовый директор:

Л.И. Гапоненко

Главный бухгалтер:

Ю.В. Калининна

Адрес редакции:

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

Отпечатано:

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

Заказ № 0801

© 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.



НАДЕЖДЫ и тревоги

Большинство ученых считают вакцинацию единственным способом побороть пандемию COVID-19, которая терзает мир уже второй год. В лабораториях продолжается активная работа по совершенствованию созданных вакцин и созданию новых. Академик А.Л. Гинцбург, директор Национального исследовательского центра эпидемиологии и микробиологии им. Н.Ф. Гамалеи, где создали первую в мире зарегистрированную вакцину от коронавируса «Спутник V», уже спасшую миллионы жизней, рассказывает в интервью о возможности создания вирусоподобных частиц, состоящих из антигенов различных вирусов. В ближайшее время начнутся клинические испытания, и это будет действительно универсальная вакцина. Интервью называется «Вирусы: в поисках компромисса».

Поиск новых видов вакцин идет во всем мире. В статье «Жизнь, новая и улучшенная» рассказывается о работе американских ученых над созданием вакцин, которые могли бы благодаря искусственным белкам стимулировать иммунную систему более эффективно, чем существующие версии, и даже подготовить наш организм к сопротивлению новым штаммам коронавируса. Автор материала считает, что эти исследования могут произвести революцию в биологии.

Вакцинация населения становится единственной надеждой в борьбе не только с коронавирусом, но и с другими смертоносными микроорганизмами. Американский врач-эпидемиолог, герой материала «Царство убийц», бьет тревогу по поводу быстрого распространения в США инфекции, вызванной грибом *Candida auris*. Иммунологи пытаются сделать противогрибковую вакцину с 1940-х гг. Сегодня наконец появились перспективы ее создания. Если она будет успешной, человечество избавится от страха перед нашествием грибов.

Есть мнение, что в наши дни ученые и врачи сосредоточили все свои усилия на борьбе с коронавирусом, а онкологическим и сердечно-сосудистым заболеваниям стали уделять гораздо меньше внимания. Интервью с членом-корреспондентом РАН Е.Н. Имянитовым «Сломанные гены: рак по наследству» опровергает это утверждение. Ученый рассказывает о разработке новых методов ранней диагностики рака, в частности о молекулярной диагностике, связанной с исследованием генетического кода. Он считает, что методы диагностики такого рода, а также другие исследования приведут к тому, что через 10–20 лет многие онкологические заболевания перестанут быть фатальными. ■

Редакция журнала «В мире науки / Scientific American»

БИОЛОГИЯ

Человек

Вода всегда была важной движущей
силой истории человечества

Эшер Росингер

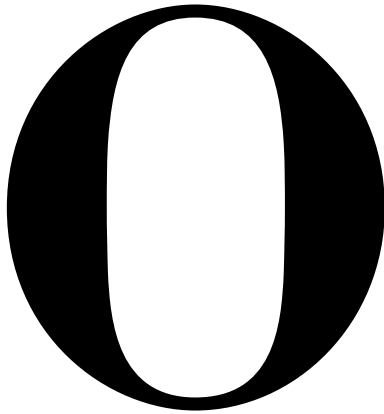




И жажда

ОБ АВТОРЕ

Эшер Росингер (Asher Y. Rosinger) — антрополог из Университета штата Пенсильвания. Изучает потребность человеческого организма в воде и влияние ее потребления на состояние здоровья людей и риск возникновения различных болезней.



Обливаясь потом, мы продирались сквозь джунгли Амазонии. С головы до ног закутанные в москитные сетки и обмазанные репеллентами, мы осторожно обходили стороной корни деревьев, стебли лиан и гигантские муравейники, слегка опережая преследующую нас тучу комаров. Пробираясь по лесу, мой боливийский научный ассистент Дино Нейт (Dino Nate), моя жена Келли Росингер (Kelly Rosinger) и я старались не отставать от Хулио — одного из моих друзей из индейского племени цимане, выступавшего в тот жаркий день в качестве нашего проводника. Цимане — небольшой народ собирателей и земледельцев, испокон веков обитающий в этом жарком и влажном уголке Амазонии. А прямо за нами бодро шествовал трехлетний сынишка Хулио, который, невзирая на жару, кружащихся вокруг насекомых и отсутствие защитной одежды, от души радовался нашему путешествию и заставлял меня испытывать жгучий стыд за мокрые от пота куртку и штаны.

Вот мы остановились перед растением, на первый взгляд показавшимся мне невысоким деревцем, а на самом деле оказавшимся густой лианой. Хулио рассказал нам, что цимане прибегают к помощи этого растения, чтобы утолить в лесу жажду. Он принялся молотить своим мачете по стволу лианы и через пару минут вырубил кусок около метра длиной. Из обоих концов перерубленного стебля начала сочиться жидкость. Хулио поднес стебель ко рту и в течение нескольких секунд пил вытекающий из него сок, а затем предложил мне сделать то же самое. Подставив под обрубок пустую бутылку, я набрал в нее немного мутноватого, слегка пузырящегося и вполне приятного на вкус сока.

Памятуя о целях своих полевых исследований, я расспрашивал Хулио и других индейцев цимане о том, откуда они берут питьевую воду — в своих деревнях, полях, на берегах рек или в лесу. Мне сообщили, что для получения жидкости для питья пригодны лишь две разновидности лиан — остальные попросту «не работают» или дают сок, вызывающий тошноту. Таким образом, для индейцев цимане некоторые

лианы — это скрытый источник воды. А наблюдения Хулио поднимают фундаментальный вопрос об адаптационных способностях людей: как в процессе эволюции формируются стратегии, используемые человеком для поиска источников воды и удовлетворения своих потребностей в этом продукте — особенно в условиях дефицита чистой воды?

Амазонский тропический лес — среда, относительно богатая питьевой водой, и даже в тех случаях, когда мы отдалялись от речек и ручьев, Хулио отлично знал, где и как можно раздобыть воду. Люди — далеко не единственные существа, старающиеся как можно лучше запомнить расположение природных источников воды: точно так же поступают и многие животные, а некоторые из них ради питья даже меняют места своего проживания. Люди же ради воды зачастую совершают гораздо более необычные поступки.

Так, для того чтобы облегчить доступ к воде, люди на протяжении всей своей истории радикальным образом меняли окружающую среду. Возьмем, например, древнеримский город Кесарию, расположенный на территории



Подросток из племени цимане пьет сок лианы в боливийской Амазонии

современного Израиля. Более 2 тыс. лет назад, когда был основан город, природных источников, которые могли бы полностью удовлетворить нужды горожан в пресной воде, в этой исторической области явно не хватало. Но благодаря своему географическому положению Кесария во многом обеспечивала колониальное господство Рима в регионе, а потому римляне, используя труд рабов, соорудили здесь несколько акведуков, осуществивших подачу воды в город из источников,

расположенных от него в 16 км. Такая система водоснабжения обеспечивала каждого из почти 50 тыс. кесарийцев примерно 145 л воды в день.

Современные города для обеспечения жителей питьевой водой используют водоводы и распределительные сети. Подобная практика привела к существенному улучшению системы общественного здравоохранения. Когда под рукой всегда есть вода, мы забываем, какую огромную роль она играет в нашей жизни. Но стоит пронестись слуху о ее возможном

отключении или загрязнении, мы тут же начинаем паниковать по поводу страшных последствий этих событий.

Если организм не получает достаточного количества воды, ухудшаются физические и умственные способности человека. Полное отсутствие воды через несколько дней может привести к смерти. Люди зависят от воды гораздо сильнее, чем многие другие млекопитающие. Проведенные недавно исследования проливают свет на возникновение этой зависимости и механизмы утоления жажды. Судя по всему, вода сыграла в эволюции человеческого рода не менее важную роль, чем пища!



Верблюды и другие пустынные млекопитающие хорошо адаптированы к дефициту воды

Почему мы потеем?

Для того чтобы понять роль воды в нашей эволюции, совершим небольшой экскурс в предысторию человечества. Примерно 2–3 млн лет назад климат в Африке, где возникли и начали развиваться гоминины (представители группы приматов, к которой относятся люди), стал более засушливым. В этот период времени на смену древнейшим представителям гомининов, австралопитекам, пришли представители рода *Ното* — более рослые и стройные существа с большей поверхностью тела и вертикальной походкой. В результате во время ходьбы люди менее сильно подвергались солнечному излучению, а их тело лучше обдувалось ветром, что повышало его способность к рассеянию тепла за счет испарения влаги (пота).

Существенно изменилось и строение тела наших предков. По мере того как с изменением климата леса уступали место степям и саваннам, а древние люди все искуснее передвигались на двух ногах по открытой местности, волосы на их теле начали исчезать, а в коже увеличивалось количество потовых желез. Такие адаптации улучшили способность наших предков избавляться от излишков тепла и благодаря этому поддерживать во время движения безопасную температуру тела. Об этом свидетельствуют данные исследования, проведенного Ниной Яблонски (Nina Jablonski) из Университета штата Пенсильвания и Питером

Уилером (Peter Wheeler) из Ливерпульского университета им. Джона Мурса.

Потовые железы — ключевой момент нашей истории. В коже млекопитающих имеются два типа потовых желез (экринные и апокринные), а также сальные железы. Экринные железы вырабатывают пот, накапливая воду и электролиты внутри клеток. У людей желез этого типа больше, чем у каких-либо иных приматов. Как показали недавно Дэниел Олдеа (Daniel Aldea) и его сотрудники из Пенсильванского университета, такое обилие эккринных потовых желез возникло, возможно, в результате повторных мутаций в гене *Engrailed 1*. В сравнительно засушливой среде, подобной той, где эволюционировали ранние гоминины, испарение пота должно было служить эффективным средством охлаждения кожи и кровеносных сосудов, а следовательно, и внутренних органов.

Будучи оснащенными столь мощной системой охлаждения, древние люди могли позволить себе стать более активными, чем другие приматы. По сути дела, как полагают некоторые ученые, загонная охота — длительное преследование жертвы до тех пор, пока не наступает перегревание ее организма, — была важной стратегией добывания пищи у наших далеких предков, которую они не могли бы использовать, если бы их организм не обладал эффективными механизмами охлаждения.

Но у повышенной способности к потоотделению есть и большой минус: она увеличивает риск обезвоживания организма. Как недавно показали Мартин Хора (Martin Hora) и его коллеги из Карлова университета в Праге, представители вида *Homo erectus* вполне могли непрерывно преследовать добычу в жарких саваннах в течение пяти часов, теряя при этом около 10% массы тела. У современных людей потеря 10% массы тела в результате обезвоживания чревата, как правило, серьезным риском нарушения физиологических и когнитивных функций или даже смерти. При более значительном обезвоживании у человека возникают проблемы с питьем и для регидратации ему требуется внутривенное вливание жидкости.

Уязвимость современных людей к обезвоживанию означает, что мы сильнее зависим от доступности внешних источников воды, чем наши сородичи-приматы, и гораздо сильнее, чем животные, адаптированные к жиз-

организма. Млекопитающие сильно различаются размерами и формой почек, а следовательно, и их способностью концентрировать мочу и сберегать воду. Так, живущие в пустынях карманные мыши могут обходиться без воды месяцами — отчасти благодаря фантастической способности их почек концентрировать мочу. Люди тоже наделены такой способностью. Когда мы теряем много воды в результате потоотделения, сложный комплекс гормонов и нервных сетей заставляют наши почки экономить воду за счет концентрации мочи. Но поскольку они делают это гораздо менее эффективно, чем почки карманных мышей, обходиться без питья мы можем лишь несколько дней.

Не умеет наш организм и запасать воду. Живущие в пустынях верблюды, напившись воды, сохраняют ее в теле неделями. Но если человек выпьет слишком много жидкости, у него тут же начинается быстрая выработка мочи.

А размеры нашего кишечника и быстрота опорожнения желудка сильно ограничивают скорость, с которой наш организм способен восполнять потери жидкости. Что еще хуже, если мы слишком быстро выпьем большой объем воды, в организме может нарушиться электролитный баланс и возникнуть гипонатриемия (резкое падение уровня натрия в крови) — состояния, представляющие для человека такую же смертельную опасность, как и само обезвоживание.

Но даже в самых благоприятных условиях, при высокой доступности пищи и воды, люди обычно полностью компенсируют значительные потери воды вследствие тяжелых фи-

зических нагрузок не ранее, чем через 24 часа. Вот почему так важно своевременно восполнять потери жидкости нашим организмом.

Утоление жажды

Я расспрашивал Хулио о лианах и прочих скрытых источниках воды, которыми пользуются цимане, не из праздного любопытства. Как-то вечером в 2009 г., через несколько недель после начала моих первых научных изысканий в джунглях Боливии, я внезапно



Акведуки поставляли воду в древнюю Кесарию от удаленных источников

ни в пустыне (овцы, козы, верблюды и др.): эти млекопитающие могут потерять 20–40% воды без особого вреда для собственного здоровья. Их желудок имеет особый отдел, где и хранятся запасы воды, — эффективное приспособление против обезвоживания.

Пустынные млекопитающие обладают самыми разными адаптациями к недостатку влаги. Некоторые из этих механизмов связаны с работой почек, играющих основную роль в поддержании водно-солевого баланса

почувствовал острый голод и жажду и решил съесть крупный плод папайи. Когда я жадно поедал сочный фрукт, сок стекал по моему подбородку. В тот момент я не обратил на это обстоятельство никакого внимания, но, забравшись на ночлег, под москитную сетку, я понял, какую ужасную совершил ошибку!

В боливийской Амазонии влажность ночного воздуха достигает 100%. Каждый вечер перед отходом ко сну я раздевался до трусов, затем плотно сворачивал одежду и раскладывал ее по вместительным, застегивавшимся на молнии пластиковым пакетам, чтобы она не промокала к утру. Примерно через час, когда я лежал под своей москитной сеткой и молил небеса хотя бы о легком прохладном ветерке, меня снова прошиб пот: я понял, что мне срочно нужно по-маленькому. Прикинув, сколько потребуется времени и сил на то, чтобы одеться, справиться нужду, а затем снова раздеться и разложить одежду по пакетам, я проклинал свое решение съесть папайю. Вдобавок той ночью мне пришлось повторить этот подвиг дважды. А потом я задумался: сколько же воды содержится в съеденном мной фрукте? Вышло, чашки три-четыре. Неудивительно, что мне захотелось в туалет!

Не исключено, что пластичность нашего пищевого поведения — лучшая защита от обезвоживания организма. Как я убедился на собственном горьком опыте в ту душную злосчастную ночь, наш организм утилизирует жидкость, содержащуюся в пище, точно так же, как и воду, которую мы пьем. Жители США получают с пищей примерно 20% всей потребляемой ими воды, а у представителей народа цимане, как показали мои исследования, данный показатель достигает 50%. Взрослые японцы, которые обычно пьют меньше воды, чем взрослые американцы, также получают с пищей примерно половину всей потребляемой ими воды. Представители разных этнических групп удовлетворяют свои потребности в воде, используя самые разные стратегии. Так, кочевники-скотоводы даасанах на севере Кении пьют много молока, которое на 87% состоит из воды. Вдобавок они жуют богатые влагой корни растений.

Шимпанзе, наши ближайшие современные родственники-приматы, также демонстрируют целый комплекс пищевых и поведенческих адаптаций, связанных с поиском, добычей и потреблением воды. Например, нередко они слизывают влагу с мокрых камней и используют листья как своего рода губки для сбора воды. Приматолог Джилл Прюиц (Jill Pruetz) из Университета штата Техас обнаружила, что в очень жаркой среде (такой, например,

как сенегальская саванна Фонголи) шимпанзе в дневные часы прячутся в прохладных пещерах, а на кормежку выходят только ночью, чтобы минимизировать тепловой стресс и сэкономить содержащуюся в организме воду. В целом же приматы (за исключением людей) получают большую часть воды с фруктами, листьями и прочими продуктами питания.

Как показало недавнее исследование Германа Понцера (Herman Pontzer) и его сотрудников из Дюкского университета, несмотря на повышенную способность людей к потоотделению, мы потребляем меньше воды, чем шимпанзе и другие человекообразные обезьяны. Тем не менее большая зависимость людей от «жидкой» воды (в отличие от воды, содержащейся в продуктах питания) означает, что для поддержания надлежащей гидратации организма мы должны затрачивать много усилий. Однако количество воды, необходимое тому или иному человеку, сильно варьирует не только между популяциями, но даже между отдельными людьми. В настоящее время существуют два основных комплекса рекомендаций относительно потребления воды, включающей и жидкость, содержащуюся в пищевых продуктах. Первый, разработанный Национальной медицинской академией США, советует мужчинам потреблять в день 3,7 л воды, а женщинам — 2,7 л (беременным и кормящим женщинам при этом рекомендуется увеличить ежедневный прием воды на 300 и 700 мл соответственно). Второй комплекс рекомендаций, составленный Европейским агентством по безопасности продуктов питания, советует мужчинам ежедневно потреблять 2,5 л воды, а женщинам — 2,0 л (беременным и кормящим женщинам также рекомендуется увеличить потребление на 300 и 700 мл соответственно). Мужчинам требуется больше воды, чем женщинам, потому что обычно они обладают более крупным телом и большей мышечной массой.

Данные рекомендации не имеют обязательного характера. Они были разработаны на основе средних показателей жителей различных областей, полученных в результате опросов и специальных исследований, и рассчитаны на здоровых людей, ведущих умеренно активный образ жизни и населяющих регионы с умеренным климатом. Некоторым людям может потребоваться большее или меньшее количество воды в зависимости от таких факторов, как привычки, климатические особенности места жительства, уровень активности и возраст.

Фактически потребление воды людьми сильно варьирует даже в странах, где ситуация с водоснабжением не внушает опасений, — в США, например, большинство мужчин

выпивают в день от 1,2 до 6,3 л, а большинство женщин — от 1,0 до 5,1 л воды. Скорее всего, существенно варьировало на всем протяжении человеческой эволюции и потребление воды нашими предками — в зависимости от уровня их активности, температуры среды, воздействия ветров и солнечного излучения, а также от размеров их тела и степени доступности самой воды.

Иногда по показателям ежедневного потребления воды сильно различаются даже два человека одного пола и возраста, живущие в одинаковых условиях и обладающие примерно одинаковым уровнем здоровья. В таких случаях различия могут быть связаны с ранним жизненным опытом людей. Развиваясь в матке, каждый человек проходит критический период развития, влияющий на многие физиологические функции, в том числе и на способность организма поддерживать водный баланс. И развиваясь в материнской утробе, и при грудном вскармливании организм малыша постоянно получает сигналы об окружающей его питательной среде. Эта информация влияет на формирование потребностей человека в воде.

Как показали экспериментальные исследования, ограничение потребления воды беременными овцами и самками крыс приводит к критическим изменениям механизмов поддержания водного баланса у их потомства. У детенышей, рожденных самками, подвергавшимися водной депривации, чаще развивалось обезвоживание организма, чем у детенышей, рожденных самками, имевшими свободный доступ к воде, прежде чем эти животные начинали испытывать жажду и приступали к поиску воды. Такие данные свидетельствуют о том, что чувствительность организма к обезвоживанию формируется еще во время внутриутробного развития.

Таким образом, сигналы о присутствии воды, получаемые организмом во время развития, могут влиять на формирование способности человека к ощущению жажды и его потребностях в воде в зрелом возрасте. В некотором смысле ранний опыт подготавливает организм развивающихся малышей к уровню доступности воды, с которым они могут столкнуться позднее. Ситуация, когда беременная женщина постоянно существует в условиях дефицита воды и ее организм хронически обезвожен, может привести к тому, что в зрелом возрасте ребенок такой женщины будет потреблять меньше воды: подобная адаптация обычна для регионов со скудными запасами воды. Но для проверки этой гипотезы требуются более обстоятельные исследования.

Чистота — залог здоровья

Если механизмы, определяющие потребности организма в воде, находятся вне сферы сознания, то поиск ее безопасных источников всецело зависит от нашей осознанной активности. Я обнаружил жаждоутоляющие свойства папайи совершенно случайно, но цимане постоянно ведут целенаправленный поиск продуктов, богатых водой. В среде, где нет источников чистой воды, потребление жидкости, содержащейся в продуктах питания, может защитить организм от болезнетворных микробов. В самом деле, как показало мое недавнее исследование, чем больше влаги цимане получали вместе с фруктами (например, папайей) и другими продуктами, тем реже они страдали от диареи.

Во многих сообществах людей сложились особые традиции питания, включающие потребление слабоалкогольных ферментированных напитков, которые могут служить важными источниками воды (кроме того, ферментация убивает множество вредных бактерий). С другой стороны, напитки, содержащие сравнительно высокий процент алкоголя, повышают выработку мочи и тем самым истощают запасы воды в организме. Как и другие индейцы Амазонии, цимане пьют ферментированный напиток под названием «чича», приготавливаемый из плодов персиковой пальмы или кассавы (маниока). Установлено, что у мужчин цимане потребление этого напитка снижает шансы подвергнуться обезвоживанию.

Доступность воды — один из старейших и наиболее насущных вызовов в истории человечества. Именно поэтому, возможно, где бы ни находились люди — в пустыне, джунглях, на шоссе в безлюдной местности и т.д., — они всегда мысленно отмечают местоположение источников драгоценной влаги. Когда Хулио разрубал своим мачете стебель лианы, за ним внимательно следил его сынишка, стараясь получше запомнить действия отца и местоположение этого необычного источника питья. А я представил себе, как такой опыт веками передавался жителями Амазонии из поколения в поколение, и неожиданно понял, что и пот, ручьями стекающий с нашей кожи, и поиск воды, способной восполнить эти потери жидкости организмом, были частью некоего всеобъемлющего процесса, который и сделал нас людьми. ■

Перевод: А.В. Щеглов

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Яблонски Н. Голая правда // ВМН, № 4, 2010.

МЕДИЦИНА

ВИРУСЫ: В ПОИСКАХ КОМПРОМИССА





фото: sputnikvaccine.com/rus

«Спутник V» стал первой в мире зарегистрированной вакциной от коронавируса и уже спас миллионы жизней. Однако процесс разработки и внедрения этой вакцины сопровождался таким количеством споров и дискуссий, что мы решили обратиться к ее создателю напрямую. Директор старейшего в нашей стране Национального исследовательского центра эпидемиологии и микробиологии им. Н.Ф. Гамалеи **Александр Леонидович Гинцбург** не боится острых и неудобных вопросов, не прячется и не скрывает проблем, но свято верит в дело, которым занимается.

— **Александр Леонидович, сегодня все знают о вакцине «Спутник V», спасшей многие жизни. Но не все знают, что ее появлению предшествовал многолетний период испытаний вакцин на основе аденовирусов. Как все это началось?**

— Вы совершенно правы. Коллектив нашего института под руководством Б.С. Народицкого в течение последних 25 лет разрабатывал технологию доставки различных генов в организм человека с помощью аденовирусных векторов. Исходно эта технология разрабатывалась не для создания вакцинных препаратов, а для генной терапии, но в силу экономических и других причин на тот момент это оказалось не очень перспективным.

Когда в 2014 г. в Африке разразилась эпидемия вируса Эбола с угрозой выхода на другие континенты, Россия подключилась к решению этой проблемы. Состоялась историческая встреча В.В. Путина с главой ВОЗ Маргарет Чан, где российская сторона взяла на себя обязательство помочь в быстром и оперативном создании вакцины против этой смертельной инфекции.

У нас не было на это нескольких лет, было некогда заниматься ослаблением исходного вирулентного штамма, и мы решили использовать принципиально новую технологию, основанную на аденовирусах, хотя сама технология и такого рода конструкции у нас уже были разработаны. Нам удалось создать за 15 месяцев эффективный и безопасный вакцинный препарат, который прошел все клинические испытания и в течение двух лет успешно использовался в Африке, не допустив распространения эпидемии по миру.

Когда началась пандемия новой коронавирусной инфекции, практически сразу зашла речь о создании вакцины, работающей на тех же принципах. Дело в том, что возбудители COVID-19 и Эболы — это РНК-содержащие вирусы, которые очень похожи по своему строению друг на друга, оба используют для проникновения в наши эукариотические

клетки специальные молекулярные машины. Сделав ставку на ту же технологию, мы не прогадали. За пять месяцев от получения госзадания до начала клинических испытаний нам удалось пройти весь необходимый путь создания вакцины, которая сейчас получила название «Спутник V».

— **Кстати, почему такое название?**

— Я могу ответить на этот вопрос, хотя он не ко мне, а скорее к К.А. Дмитриеву, главе Российского фонда прямых инвестиций. Когда этот фонд начал работать над коммерциализацией и выводом нашего препарата на международную арену, необходимо было присвоить ему хорошее громкое имя. «Спутник» — это чисто русское слово, я бы сказал, родное для нас. Напомним тем, кто в это время еще не жил, что оно возникло в 1957 г. благодаря запуску на околоземную орбиту первого советского искусственного спутника. Это слово полностью ассоциируется с Россией и на всех языках звучит одинаково, что имеет маркетинговое значение. Этот расчет полностью оправдался.

— **А что значит буква V?**

— Наверное, для иностранного потребителя это означает *Victoria*, «победа», что тоже хорошо.

— **Насколько мне известно, аденовирусы совершенно безопасны для человеческого организма. Однако бытуют страшные легенды, что это болезнетворные микроорганизмы, которые разрушают нас изнутри, и сама вакцина встраивается в геном, делая нас мутантами. Расскажите, почему это невозможно.**

— С аденовирусами человечество родилось и живет всю историю своего существования, а нам они достались от наших предков — приматов. За это время человечество успело размножиться до 7,5 млрд, то есть на его фертильность аденовирусы никак не повлияли. Они не были замечены ни в онкогенности, ни в мутагенности.

А если говорить конкретно о нашей вакцине, то аденовирусные векторы, которые там исполь-

зуются, созданы таким образом, что генно-инженерным способом у них удалены все гены, ответственные за их размножение. Они неспособны размножаться в нашем организме. Если в результате укола в наш организм вводится 10^{11} частиц, созданных на основе этих векторов, то плюс к этому количеству одна частица в нашем организме не образуется.

Если так, то никаких возможностей его влияния на наш геном в принципе не может быть. Таким образом, мутации полностью исключены. Неоднократные опыты, проводимые в рамках доклинических и постклинических исследований, по возможности влияния этих векторов на фертильность и потомство показали, что такое влияние отсутствует. Через плаценту



Кандидат биологических наук Д.А. Егорова в Лаборатории генной инженерии патогенных микроорганизмов (1,2)

векторы не проникают. Хотя вакцина и создана на основе живых вирусов, конечный продукт не представляет собой живой объект, способный к размножению.

— **А вообще вирус — живой объект? На этот счет существуют разные точки зрения даже в профессиональной среде.**

— Конечно, вирус — живой объект по той простой причине, что стратегия его существования направлена на размножение. Другое дело, что он не может размножаться вне живого организма, и это его особенность. Размножаясь, он мутирует и в результате мутаций ведет себя по Дарвину — эволюционирует. То, что происходит сейчас в плане вакцинации, показывает нам всю остроту этих проблем. Появляются новые, опасные вариации вируса, и мы должны понимать, как противостоять их натиску, какие выработать новые стратегии для успешной борьбы с COVID-19.

— **Как вы сказали, главное свойство вирусов — способность к мутациям, в результате которых сейчас появился новый дельта-штамм, оказавшийся более опасным, чем все предыдущие. Вы проводите научные исследования мутаций вирусов. Что здесь удалось важного выяснить?**

— Да, мы действительно проводим эти исследования, не только потому что это интересно с точки зрения эволюции вирусов, но и потому что это имеет громадное практическое значение. В последние три месяца дельта-штамм вытеснил все предыдущие варианты COVID-19 и сейчас составляет практически 100% тех штаммов, которые у нас циркулируют.

— **Как у него это получилось?**

— Секвенирование, то есть определение нуклеотидной последовательности этого вируса, показывает, что в его последовательности возник ряд точковых замен. Аналогичные замены возникали и у предшествующих штаммов, но здесь обнаружилось интересное свойство: эти точковые замены влияют не только на антигенную специфичность вируса, но и на характер его взаимодействия с нашими клетками.

Если так называемый классический штамм, который впервые появился в Ухане, и все последующие штаммы были антигенно видоизмененными, но попадая в наши клетки, разрывали их и выходили наружу, то данный штамм ведет себя иначе. Он не разрывает в результате размножения эукариотическую клетку, а делает отверстие в мембране соседней клетки и проникает внутрь, не повреждая предыдущую.

Если провести аналогию с многоквартирным домом, он ведет себя как жулик, который проникает в квартиру, но не выходит на лестничную площадку, представляющую собой сосуд, где плавают антитела против него или, иначе говоря, стоит



полицейский с наручниками, готовый его арестовать. Он проламывает дырку в стене к соседям и пробирается к ним через нее.

— **Такая стратегия эффективнее с точки зрения вируса?**

— С точки зрения защиты от нашей иммунной системы это более успешная стратегия, потому что, находясь все время внутри клетки, он защищен от тех антител, которые могут наработать клетки памяти. Он образует так называемые синцитии, многоядерные крупные клетки, внутри которых он передвигается, формируя необычные патологические структуры. Таким образом он может размножаться довольно долго, поражая десятки клеток, пока этот мешок покрытых общей мембраной нежизнеспособных клеток механически не лопнет, и тогда огромное количество болезнетворных вирусов вывалится в нашу кровеносную систему.

Концентрация вируса при этом повышается не постепенно, а разом, одностадийно. Иммунная система не успевает наработать антител против такого количества вирусов, и вирус успевает проникнуть в легкие, очень быстро переводя болезнь в тяжелую стадию. Это наблюдают клиницисты. Если раньше у больных все штаммы в течение двух недель или дольше проходили путь от легкой стадии до тяжелой и врачи успевали провести все необходимые лечебные процедуры, а иммунная система успевала наработать необходимое количество антител и нейтрализовать вирус, то сейчас благодаря такой хитрости дельта-штамм проходит тот же путь за четыре-пять дней. Успеть стало значительно труднее.

— **Что в этой ситуации делать?**

— Закономерный вопрос. Здесь Минздрав сработал на опережение, и если бы все его послушались, то количество тяжелых и тем более смертельных

случаев было бы значительно меньше. Первое — это обязательно вакцинироваться, а второе — для тех, кто вакцинировался, через полгода воспользоваться вариантом «Спутник Лайт». То же самое для тех, кто переболел. Это необходимо сделать для нейтрализации вируса на входе в наш организм, не надеясь на то, что у нас успеют сработать клетки памяти. Надо постоянно поддерживать уровень протективных антител против дельта-штамма, и для этого предназначен первый компонент вакцины «Спутник Лайт».

— **Можно ли предсказать, какие мутации вируса ожидают нас в будущем, или приходится действовать постфактум?**

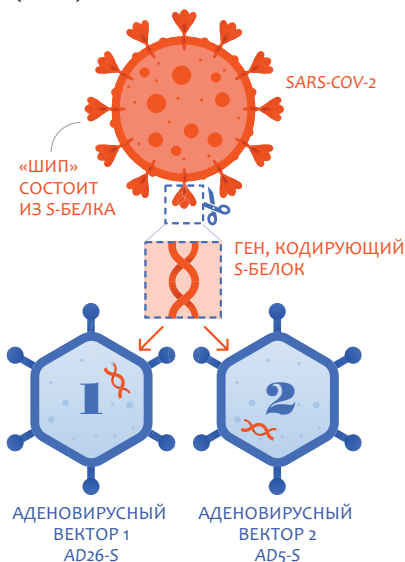
— Математических моделей, которые позволяют прогнозировать в данном случае ход эволюции вируса, не существует. Однако известно, что необходимо иметь современный высокотехнологичный мониторинг штаммов, которые сейчас циркулируют, чтобы, не дожидаясь, когда этот возбудитель займет решающее место в инфекционном процессе, заранее определить его патогенные свойства, вирулентность и способность образовывать необычные структуры — синцитии. Далее необходимо вести жесткий мониторинг этого штамма и разрабатывать все профилактические, диагностические и иммунобиологические подходы для его нейтрализации.

Двухвекторная вакцина от коронавируса

1

Создание вектора

Вектор — это вирус, лишенный гена размножения и используемый для транспортировки в клетку генетического материала из другого вируса, против которого делается вакцина. **Вектор** не представляет опасности для организма. Вакцина создана на основе аденовирусного вектора, который в обычном состоянии вызывает острые респираторные вирусные инфекции (ОРВИ).

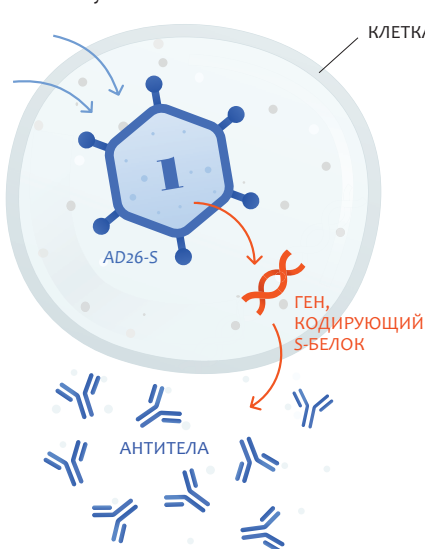


В состав каждого вектора встраивают ген, кодирующий **S-белок** шипов вируса SARS-COV-2. Шипы формируют «корону», из-за которой вирус получил свое название. С помощью шипов SARS-COV-2 проникает в клетку.

2

Первая вакцинация

Вектор с геном, кодирующим **S-белок** коронавируса, проникает в клетку

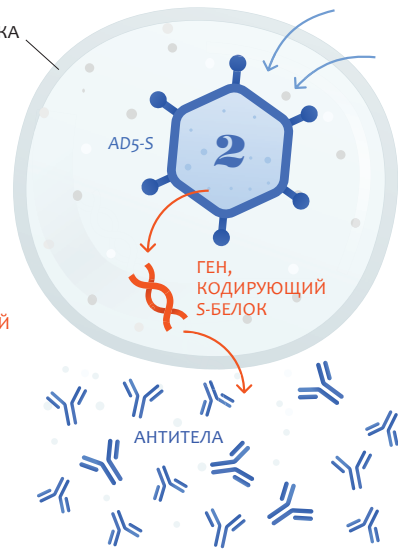


Организм синтезирует **S-белок**, в ответ начинается выработка **иммунитета**

3

Вторая вакцинация

Через 21 день происходит повторная вакцинация



Вакцина на основе другого, незнакомого для организма, аденовирусного вектора подстегивает иммунный ответ организма и обеспечивает длительный иммунитет

Использование двух векторов — уникальная технология НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, отличающая российскую вакцину от других разрабатываемых в мире вакцин на базе аденовирусных векторов

Источник: НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, РФПИ, 2020.

— Знаю, что вы работаете над созданием новых, более эффективных вакцин. Чего ожидать здесь? Появится ли универсальная вакцина, способная нейтрализовать любой штамм?

— Я бы выделил работы, которые особенно актуальны в течение ближайшего времени. Речь идет о возможности создания вирусоподобных частиц, которые состоят из антигенов различных вирусов. Мы уже сейчас видим, что нас окружают несколько различных антигенных вариантов возбудителей COVID-19, а значит, можно технологически собрать вирусоподобную частицу, которая будет состоять не из одного антигена, а из четырех-пяти вариантов.

С другой стороны, эта частица может состоять не только из антигенов COVID-19, но и из антигенов вариантов вируса гриппа. Наша платформа, которая уже очень хорошо проработана (этим вопросом у нас занимается член-корреспондент РАН Т.В. Гребенникова), выходит на стадию поздней доклиники, а с начала следующего года, мы надеемся, конкретные вакцинные препараты перейдут в стадию клинических испытаний. Это будет действительно универсальная вакцина в клиническом понимании слова.

— В последние годы человечество стало забывать о роли вирусов в нашей жизни. Много внимания уделялось онкологии, сердечно-сосудистым заболеваниям, разрабатывались новые методы лечения инсультов, что, безусловно, прекрасно, но инфекции как будто ушли на второй план. Пандемия поставила нас на место, напомнив, что никуда от нас такие болезни не денутся. Как вы себе представляете будущее вакцинологии? Появятся ли принципиально новые быстрые вакцины, сверхэффективные и сверхбезопасные, которые избавят человечество от смертельных болезней?

— Безусловно, такие исследования будут востребованы, поскольку руководства стран не могут допустить повторения того, что мы переживаем сейчас. Это страшный удар по народонаселению и мировой экономике, поэтому научный потенциал будет направлен на создание универсальных технологий. Об этом не раз говорил и наш президент. Страна должна располагать технологиями, которые будут позволять в течение нескольких месяцев создавать новые вакцинные препараты.

Для этого надо иметь технологические возможности, которые будут быстро реализовываться в зависимости от того, какой возбудитель появится, в создании как новых иммунобиологических, так и терапевтических препаратов, в частности на основе моноклональных антител. Эта технология у нас тоже хорошо разработана и высокоэффективна, хотя стоимость таких препаратов лимитирует их поголовное применение. При этом мы

понимаем: если они работают и помогают людям, вопрос цены должен так или иначе решаться.

Мы должны постоянно располагать производственными мощностями, позволяющими в критический момент снабдить население необходимыми препаратами. Сегодня это проблема из проблем, и здесь нужна смелая и мудрая позиция государства — как обеспечить эти мощности в межэпидемический период. Надо иметь очень четкий план с возможностью быстрейшего введения этих как лечебных, так и производственных ресурсов в эксплуатацию, если потребует жизнь. Надеюсь, нынешняя пандемия нас всех этому научила.

— Александр Леонидович, как получилось, что вашей профессиональной областью стала именно вирусология?

— В 1969 г. я поступил на биофак МГУ и практически сразу выбрал кафедру вирусологии, о чем никогда не пожалел. Академик А.Н. Белозерский,

Если понимать всю логику на молекулярном уровне, можно было бы создать лекарства от всех внутриклеточных патогенов, эффективные и безопасные, способные защищать нас от самых тяжелых заболеваний, включая онкологические

один из основоположников молекулярной биологии в СССР, который создал эту кафедру, собрал наиболее сильный профессорско-преподавательский состав, что очень привлекало тех, кто хотел посвятить себя научным исследованиям. Я не был исключением. Вирусолог и генетик член-корреспондент РАН В.И. Агол, которому сейчас больше 90 лет, но он по сей день трудится в МГУ, во многом способствовал тому, что я пришел на эту кафедру, а потом он же меня направил на стажировку в иммунологический отдел Курчатовского института, где я получил большой научный опыт. С благодарностью вспоминаю непростые, но очень плодотворные семь лет, когда я писал там свою кандидатскую диссертацию. Все это помогает мне до сих пор, в том числе вот уже 24 года руководить этим институтом.

— Ваш институт славен своими научными школами. Как удается их сохранять?

— У нас в НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи замечательный коллектив. Он сейчас состоит из сотрудников трех больших подразделений. Это сам НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Н.Ф. Гамалеи, который всю жизнь занимается болезнетворными микроорганизмами, Институт вирусологии им. Д.И. Ивановского, исследующий патогенные вирусы, и наше производство, делающее в том числе разнообразные вакцины. Это, например, знаменитая вакцина БЦЖ против туберкулеза, которую получают младенцы в роддомах Москвы, а также многие другие диагностические и лечебные препараты. Теперь это и «Спутник».

Мы гордимся своими научными школами. Б.С. Народицкий, которого я уже упоминал, воспитал множество замечательных учеников. Это, например, Д.Ю. Логунов, которого мы выдвигаем в академики, один из основных разработчиков «Спутника», лауреат Государственной премии нынешнего года. Это И.В. Должикова, Д.В. Щербляков, В.А. Гущин и многие другие.

Очень важны школы В.М. Жданова, Д.К. Львова, Т.В. Гребенниковой. Многие из наших корифеев здравствуют и по сей день работают в нашем институте. У нас трудятся представители одновременно четырех поколений ученых — от 25-летних до 90-летних. Информация внутри школы передается не только с помощью электронных носителей и книг, но и из уст в уста.

Если кому-то необходимо познакомиться с актуальными вопросами менингококковой инфекции, ему не надо рыться в интернете или идти в библиотеку, а можно подойти к Н.Н. Костюковой. Ей 95 лет, но она в течение 15 минут расскажет всю историю вопроса, включая последние молекулярно-генетические инновации, связанные с разработкой диагностических и профилактических препаратов. Или подойти к Д.К. Львову, который с удовольствием расскажет про экологию любого вируса. Всегда открыт для общения и Ф.И. Ершов, который мгновенно изложит всю историю иммуномодуляторов и их влияние на любой компонент иммунной системы. В таких школах, живых и неформальных — наша сила. Они играют огромную роль в подготовке молодых кадров. Сейчас образовался довольно большой конкурс среди молодежи, желающей у нас работать, так что берем лучших.

— Продолжается ли работа над другими проблемами или вы полностью переключились на COVID-19?

— Наш институт занят не только коронавирусом, есть и другие важнейшие направления, которые зачастую тесно связаны с данной проблематикой. Например, в результате массового попадания пациентов с этим заболеванием в стационары обостряется и без того наболевшая проблема внутрибольничных инфекций. Сейчас эта проблема стала кричащей. Массовое применение антибиотиков

привело к тотальной резистентности микрофлоры, и большинство смертельных случаев связаны с сепсисом, когда к вирусной инфекции присоединяется бактериальная.

Одна из важнейших задач нашего времени — создание новых химиопрепаратов, которые преодолевают полирезистентность внутрибольничных штаммов и к которым не возникает такая резистентность.

Эта задача у нас успешно решается. Мы вышли на заключительную стадию клинических испытаний, которые проводим совместно с Городской больницей № 52, занимающейся спасением таких больных. Это работа школы Н.А. Зигангировой, которая возглавляет отдел медицинской микробиологии. Ею создано соединение, которое подавляет определенную мишень в так называемой третьей транспортной системе. Это фактор патогенности, который присутствует у большинства грамтрицательных бактерий, а они в свою очередь выступают основными переносчиками генов антибиотикорезистентности — главного бича внутрибольничных инфекций. В результате вышеупомянутой работы создано низкомолекулярное соединение, подавляющее эту третью транспортную систему, при этом не ограничивая размножение самой бактерии. Тем самым на эти бактерии не создается сильное эволюционное давление. Они не меняются, но перестают размножаться, в результате иммунная система благодаря фагоцитозу убивает такие бактерии. Подобные исследования не менее актуальны, чем создание вакцинного препарата, поэтому мы также выдвигаем Н.А. Зигангирову в Российскую академию наук.

— Александр Леонидович, есть ли в опасном мире вирусов какие-то загадки, которые вам хотелось бы разгадать в первую очередь?

— Этих загадок великое множество. Весь мир вирусов — сплошная загадка. Логистика поведения вирусов внутри клетки совершенно неясна. Как все это работает на самом деле, мы не знаем, можем лишь предполагать. Если проводить аналогию с железной дорогой, то это составы, принципы движения которых непонятны, и нет умных стрелочников, которые могли бы переключать стрелки. Если понимать всю логистику на молекулярном уровне, можно было бы создать лекарства от всех внутриклеточных патогенов, эффективные и безопасные, способные защищать нас от самых тяжелых заболеваний, включая онкологические.

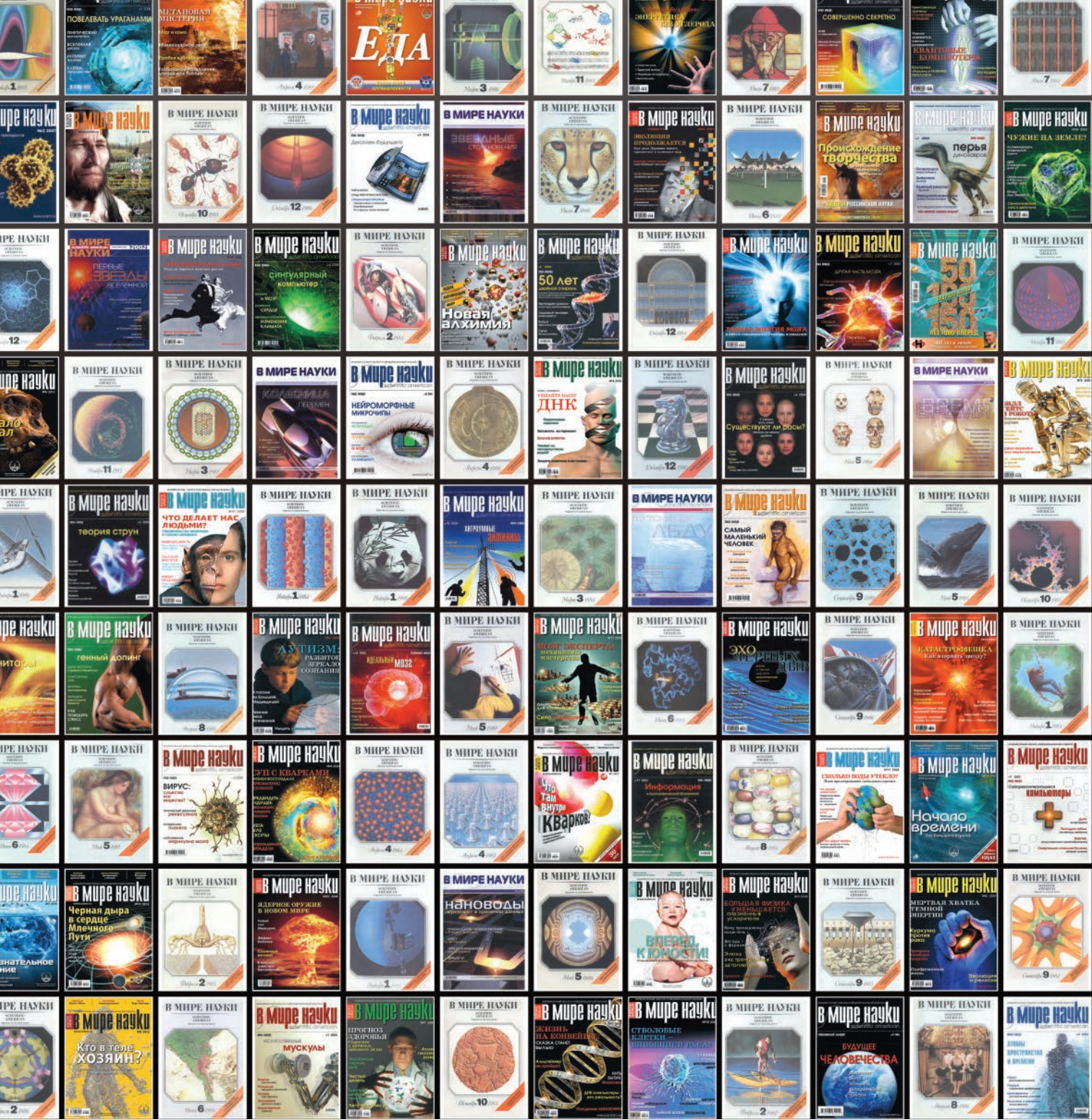
— Можно ли сказать, что, поняв логистику поведения вирусов, мы познаем мир?

— Молекулярный мир — пожалуй, да.

— А такое возможно?

— Вряд ли такое произойдет при моей жизни, но последующим поколениям, уверен, это удастся. Для того и работаем. ■

Беседовала Наталья Лескова



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



ГЕНЕРАТОР ИДЕЙ



Президенту НИЦ «Курчатовский институт»



1. М.В. Ковальчук на записи телепередачи *Academia*.
2. Выступление на церемонии присуждения звания Почетного доктора Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.
3. На заседании Совета при Президенте РФ по науке и образованию.

- 4. В зале Курчатовского синхротрона.
- 5. С президентом РАН А.М. Сергеевым на совместном заседании ученого совета НИЦ «Курчатовский институт» и президиума РАН, посвященном 75-летию Курчатовского института.
- 6. В рабочем кабинете на синхротроне «КИСИ-Курчатов».



Михаилу Валентиновичу Ковальчуку исполняется 75 лет



Ведущий ученый в области рентгеновской физики и кристаллографии, создатель принципиально нового метода изучения структуры вещества, талантливый организатор науки, один из идеологов развития нанотехнологий в России, автор концепции конвергентных природоподобных технологий и многих других идей, ведущий научной телепрограммы **Михаил Валентинович Ковальчук** 21 сентября отмечает свой юбилей.

Мы давно сотрудничаем с М.В. Ковальчуком, знаем его не только как ученого и руководителя легендарного Курчатника, но и как обаятельного, увлеченного, широко образованного человека, в котором, как пишут журналисты, лирик часто побеждает физика — не только потому, что он много и вдохновенно цитирует любимых поэтов, но и из-за его влюбленного, даже страстного отношения к науке. Мы рады, что некоторые идеи Михаила Валентиновича Ковальчука были представлены, иногда даже впервые, на страницах журнала «В мире науки» и портала «Научная Россия», но, конечно, прежде всего, в знаменитой телепрограмме С.П. Капицы «Очевидное — невероятное», гостем которой в свое время неоднократно был М.В. Ковальчук.

От всей души поздравляем Михаила Валентиновича с юбилеем и желаем ему крепкого здоровья, неиссякаемой энергии, новых масштабных свершений!

Предлагаем вашему вниманию дайджест из самых ярких материалов М.В. Ковальчука, которые в разные годы были опубликованы в журнале «В мире науки».



КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ: ОТ АТОМНОГО ПРОЕКТА ДО КОНВЕРГЕНЦИИ

(ВМН, спецвыпуск, 2013)

И.В. КУРЧАТОВ И АТОМНЫЙ ПРОЕКТ

В СССР фамилию И.В. Курчатова знал любой школьник. Он, его сотрудники, созданный им институт уже в 1950-е гг. стали легендарными. Конечно, с самим Курчатовым я не был знаком, лишь читал о нем, слышал от его друзей и соратников. Невозможно представить, как этот человек буквально вытащил на себе всю махину советского атомного проекта. И.В. Курчатов был чрезвычайно широко образованным ученым, поэтому он понял и смог решить

сложнейшие проблемы атомной энергетики, охватывая самые разные области знаний — химию, физику, геологию, информатику. По сути, он был именно междисциплинарным ученым, это было необходимым требованием для организации новой атомной науки. Научную эрудицию, интуицию, дар собирать вокруг себя настоящих подвижников, концентрировать все силы на достижении приоритета И.В. Курчатов сочетал с блестящим талантом организатора. В мировой науке это встречается крайне редко. Он создал с нуля, в тяжелейших условиях войны совершенную научную систему, школу, которая не только решила в кратчайшие сроки задачу создания ядерного оружия, но и стала родоначальником взрывного развития множества уникальных технологий, научных направлений, которыми мы гордимся и по сей день. Из атомной бомбы возникла атомная энергетика, как одно из ее направлений развилась атомно-водородная энергетика, где для получения

водорода используют высокотемпературные газовые реакторы. Следующий шаг — от процесса деления атомного ядра к синтезу, термоядерной энергетике, управляемому термоядерному синтезу, для чего было необходимо освоить магнитное удержание плазмы, а значит, возникла потребность в новых материалах со свойствами сверхпроводимости. В процессе создания атомной бомбы возник атомный реактор, а будучи установленным на подводную лодку, он обеспечил ей недостижимый ранее запас автономности. После этого мы сделали первый в мире атомный ледокол, благодаря чему и сегодня активно присутствуем в Арктике. Для атомного проекта было необходимо научиться выделять различные изотопы и работать с ними, и мы создали промышленность по разделению изотопов, которые лежат в основе ядерной медицины, диагностики, позитронно-эмиссионной томографии, лучевой терапии и т.д. Затем мы начали строить ускорители и нейтронные реакторы, в результате создали уникальную исследовательскую базу, в полной мере работающую сегодня в Курчатковском институте.

СИНХРОТРОННАЯ ЭПОПЕЯ

Я хорошо знал последователя И.В. Курчатова — А.П. Александрова. Он сыграл большую роль в моей научной судьбе. Анатолий Петрович Александров много лет был директором Курчатковского института и президентом АН СССР, обладал огромным авторитетом, жизненным опытом и колоссальной интуицией.

В начале 1980-х гг. во всем мире начиналось развитие микроэлектроники, и благодаря А.П. Александрову наши совместные с Курчатковским институтом работы были включены в межведомственную программу по микроэлектронике. В рамках этой деятельности мы познакомились с Е.П. Велиховым. Тогда это был его главный научный интерес после физики плазмы, УТС. Будучи по своей сути государственным человеком, Е.П. Велихов вынес проблему развития микроэлектроники



В рабочем кабинете Военного инновационного технополиса ЭРА

и информационных технологий у нас в стране на высший уровень, создал и возглавил отделение информационных технологий в АН СССР, начал развивать эти технологии и в Курчатковском институте, где впоследствии родился российский интернет. С 1984 г. началась синхротронная эпопея, когда параллельно шло строительство мощного промышленного синхротрона для микроэлектроники в Зеленограде и небольшого исследовательского в Курчатковском институте. В этой деятельности участвовали многие ученые из Курчатника, новосибирского Института ядерной физики им. Г.И. Будкера, Института кристаллографии им. А.В. Шубникова, ряда зеленоградских НИИ. После развала советской системы ВПК и ключевых министерств строительство Зеленоградского синхротрона заморозилось на долгие годы, а Курчатковский удалось довести до ума. В 1998 г. в Министерстве науки нашими стараниями при активной поддержке академиков А.Ф. Андреева и Ю.А. Осипьяна была открыта Федеральная программа по синхротронному излучению. Е.П. Велихов и тогдашний директор института А.Ю. Румянцев создали в Курчатнике Институт синхротронных исследований и предложили мне его возглавить с учетом моего опыта работы практически на всех синхротронах мира, а также активного участия моей лаборатории рентгеновской оптики и синхротронного излучения Института кристаллографии РАН в создании станций на Курчатковском синхротроне. Будучи кристаллофизиком, то есть

На пресс-конференции в информационном агентстве ТАСС



междисциплинарным исследователем, благодаря работе на синхротронах, объединяющих ученых самых разных специальностей от физиков-теоретиков до археологов, оптиков и ускорительщиков я все время углублял междисциплинарность.

ДИРЕКТОР КУРЧАТОВСКОГО ИНСТИТУТА

Я включился в работу Курчатковского института в 1998 г., будучи при этом директором академического Института кристаллографии. На синхротроне все еще было в стадии строительства, монтажа первых станций: ПРО, БЕЛОК, РКФМ, рентгеновской кристаллографии, спроектированных и созданных в ИК РАН. В октябре 1999 г. пустили первый пучок, на торжественную церемонию открытия приехал премьер-министр В.В. Путин. Это было знаковым событием: впервые за десятилетие удалось сделать важный шаг для всей нашей науки. По сей день синхротрон Курчатковского центра синхротронного излучения (КЦСИ) остается единственным специализированным источником СИ на постсоветском пространстве.

В 2005 г. Е.П. Велихов предложил мне стать директором Курчатковского института. Для меня это стало неожиданностью. Мы только начали выкарабкиваться из провала предыдущего десятилетия, возглавляемый мной Институт кристаллографии РАН успешно развивал новые темы, связанные с белковой кристаллографией, нанобиотехнологиями, рентгеновскими методами диагностики, получением молекулярных пленок и т.д., а тут предстояла абсолютно новая, колоссальная по масштабам и сложности задача.

Предыдущие перестроечные годы не прошли даром и для такого гиганта советской науки, как Курчатковский институт. Вся научная система России за эти годы была дестабилизирована, состояла из кластеров, каждый из которых боролся за выживание. Я глубоко убежден в том, что наука ни одной страны мира не восстановилась бы после такого глубокого шока. Мы выжили только благодаря огромному потенциалу советской науки, ее научным школам, которые, как каркас, продолжали сдерживать рассыпающуюся на глазах конструкцию.

ОТ МИКРОБИОЛОГИИ К НАНОТЕХНОЛОГИЯМ

Необходим был новый глобальный проект, который и «потащит» за собой уже существующие направления, и даст старт принципиально новой науке.

Сначала мне представлялось, что таким локомотивом может стать синхротрон с его междисциплинарной сущностью, широкими возможностями для материаловедения, диагностики, но в процессе стало ясно, что это пусть важная, но частность, а нужна идеология научного ренессанса. Постепенно эта идеологическая линия начала вырисовываться все яснее. В провальные для российской науки 1990-е гг. во всем мире произошел гигантский скачок в развитии исследований с использованием СИ. Благодаря рентгеновскому и синхротронному излучению развилась, например, молекулярная биология. Неслучайно первые крупные мировые центры наноисследований стали образовываться на базе уже существующих синхротронных источников, прежде всего в США при национальных



лабораториях (Аргоннской, Брукхейвенской, им. Лоуренса в Беркли и др.). Эти американские наноцентры были разнонаправленными — кто-то ориентируется больше на биотехнологии, кто-то на нанодиагностику и т.д. На Курчатовском синхротроне мы развернули исследования в области материаловедения, нано- и биотехнологий, молекулярной биологии и медицины, методов нанодиагностики с атомарным разрешением. Поэтому к названию «Курчатовский центр синхротронного излучения» в 2005 г. было добавлено «и нанотехнологий», поскольку к тому времени уже стало очевидно их взаимодополнение. Нанотехнологии, суть которых в конструировании принципиально новых материалов путем направленного манипулирования атомами и молекулами, уже давно развивали и в нашей стране, и за рубежом. Но понимание того, что это не просто еще одна новая технология (пусть даже атомно-молекулярная), а переход на новый этап научно-технологического развития, возникло в начале 2000-х гг.

О РАСШИФРОВКЕ ГЕНОМА ЧЕЛОВЕКА

На территории Курчатовского института мы создали Центр нанотехнологий, который включал в себя новый нанотехнологический корпус, модернизированный Курчатовский центр синхротронного излучения и исследовательский реактор ИР-8. В институте существовала также научная школа по микроэлектронике. Из «нанотехнологических» примеров работ тех лет — разработка новых наноконструкционных материалов для корпусов атомных реакторов и наноструктурированных покрытий

для различных инструментов; новые методики синтеза наноструктурных электрокатализаторов (в том числе многокомпонентных) и нанесения электрокаталитических слоев; создание экспериментального датчика давления жидких и газообразных сред с уникальными характеристиками на станции ЛИГА с использованием метода глубокой рентгеновской литографии; новые методы получения токонесущих элементов и лент из высокотемпературных сверхпроводников; разработка технологий создания нанопорошков различного применения — от авиации до биомедицины; создание наноэлектромеханических устройств, в том числе микророботов, способных перемещаться внутри кровеносных сосудов, и т.д.

Инфраструктура Курчатовского института — синхротронный и нейтронный источники, суперкомпьютер, технологический комплекс микроэлектроники — составила мощную базу не только для материаловедческих исследований. Мы начали восполнять недостающую биологическую составляющую, собирать коллектив единомышленников, подключили к работе известных российских биологов, прежде всего академика К.Г. Скрябина. Его коллектив в кратчайшие сроки оборудовал биологический корпус, запустили первые направления — гено-инженерное и белковую фабрику. Первой «выстрелила» расшифровка генома. В начале 2000-х гг. во всем мире начался прорыв в геномике, связанный с развитием нанотехнологий и молекулярной биологии, в результате чего появилось новое направление — ускоренная расшифровка генома живых существ. Расшифровка генома человека, произведенная в лаборатории геномики Курчатовского НБИКС-центра в 2009 г., была восьмой в мире.



ПРЕКРАСЕН НАШ СОЮЗ

(ВМН, № 4, 2015)

О НБИКС-ТЕХНОЛОГИЯХ

В Курчатовском институте создан центр НБИКС-технологий. Нанотехнологии — это методология конструирования в основном неорганических материалов путем атомного манипулирования. Биотехнология вводит сюда биоорганику, и мы можем построить гибридный материал — неорганическую подложку, на поверхности которой находится биоподобный детектор, например фоточувствительный белок родопсин. Затем информационные технологии превращают неорганическую подложку



На станциях Курчатовского синхротрона

в интегральную схему. Мы создаем некий детектор с биоприемником и с интегральной схемой, которая не только что-то измеряет, но и выдает сигнал обратной связи — это известные микроэлектромеханические системы (МЭМС). И, наконец, когнитивные технологии, основанные на изучении сознания, принятии решений, фактически создают базу для создания алгоритма оживления, одушевления создаваемых систем. И все это через когнитивные исследования базируется на социогуманитарных технологиях.

Например, мы решили создать искусственный глаз. Для этого нужно собрать десятки разных специалистов — медиков, биологов, химиков, кристаллографов, физиков, инженеров и т.д. Только их каждодневная работа в одном коллективе, единая цель даст возможность решить эту проблему. Главная идея НБИКС-конвергенции — воссоздать природоподобные технологии на основе соединения достижений микроэлектроники с образцами живой природы. Современная наука уже способна воспроизводить системы и процессы живой природы — например, синтезировать клетки, искусственные ткани и органы. В этом смысле НБИКС-конвергенция имеет ярко выраженную направленность на человека. Ведь речь идет о новых материалах и системах, необходимых прежде всего для медицины (включая диагностику, терапию, доставку и изготовление лекарств, замену поврежденных тканей и целых органов), для транспорта, связи, жилья, охраны окружающей среды. Еще одно важнейшее направление НБИКС-конвергенции — воссоздание природоподобной генерации энергии и крайне экономного природоподобного энергопотребления. Такие исследования также полным ходом идут сейчас в Курчатовском институте. Фактически это и есть конвергенция наук и технологий, первый этап НБИКС-проекта — новопо-
рыва XXI в.

О ВОЗМОЖНОСТЯХ НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Современная междисциплинарная база Курчатовского института — это единственный на постсоветском пространстве специализированный источник синхротронного излучения, нейтронный исследовательский реактор, суперкомпьютер, технологический комплекс

микроэлектроники, токамаки. Такое сочетание высокотехнологичных установок на площадке одного института не имеет аналогов.

У нас восемь ресурсных центров, в которых сосредоточено самое современное оборудование. Сейчас активно идет создание технологического корпуса, который будет все это переводить в практику.

Чем это полезно для гуманитарных наук? Например, есть объект, которому много тысяч лет. Неважно, какой он — органический, биоорганический, неорганический. Мы пускаем на него пучок рентгеновского излучения или нейтронов, который пронизывает этот материал, и можем его зафиксировать, увидеть поглощение, определить толщину, коэффициент поглощения и т.д. Но часть этого проходящего излучения может отразиться при определенных условиях. И тогда мы можем увидеть отраженные в нем лучи, структуру. Часть поглотится, и поглощение будет выделено веществом в виде флуоресцентного кванта или электрона, имеющего характеристическую энергию. Это своеобразный «лейбл» вещества. Сочетание дифракции и спектроскопии дает возможность определить, в каком положении находится атом в любом веществе и каков тип этого атома. В применении к проблеме сохранности музейных объектов мы можем увидеть и изучить происходящие в них процессы деградации на атомном уровне, понять, почему так происходит, и принять решение, как на это можно повлиять.

О МАМОНТЕНКЕ ЮКЕ И СГОРЕВШИХ СВИТКАХ

Синхротронное излучение — это базовая диагностика для многих направлений: от медицины и археологии до наук о Земле. Работа с органическими и неорганическими соединениями, создание трехмерных моделей, исследование объектов на атомарном уровне — лишь малая часть возможностей, которые дает синхротрон. Мы можем с его помощью видеть, как устроены атомарная структура или молекула, можем наблюдать поверхность на уровне мембраны, ее дефекты, примеси и пр. Объектом



На трибуне Первого Российского кристаллографического конгресса в Москве

исследования могут быть различные археологические артефакты, органические останки, содержащие генетические материалы для анализа ДНК, произведения искусства, архитектуры, живописи, ювелирные украшения. При этом можно работать с объектами очень малых масштабов, что крайне важно. Это дает возможность проводить исследования, не рискуя утратить оригинальный объект, ведь достаточно лишь нескольких частиц, чтобы получить нужный результат.

Говоря о возможностях синхротрона, можно вспомнить о свитках, сгоревших при извержении Везувия 24 августа 79 г., но сохранившихся в виде застывшего пепла. С помощью синхротронного излучения удалось прочитать надписи на этих свитках, сделанные 2 тыс. лет тому назад. Еще один пример — компьютерная томография статуи Будды, которая завершилась удивительной находкой мумии монаха внутри нее.

Сейчас активно развиваются также аддитивные технологии, которые позволяют осуществлять вместе с компьютерными технологиями реконструкцию объектов. Около 20 лет назад, например, с помощью таких технологий были идентифицированы останки царской семьи. Подобные технологии позволяют воспроизводить в принципе любые модели. Это важно, например, не только в медицине, но и в реставрационных работах и т.д.

Из недавних примеров. В Курчатовском институте мы изучали мозг мамонтенка Юки, который пролежал во льду 40 тыс. лет. Была сделана томограмма, а затем стереолитографическая копия его мозга, которая позволила увидеть его структуру и сделать 3D-модель.

Нет сомнений, что такая конвергенция современных естественно-научных методов и гуманитарного знания готовит нам в самом ближайшем будущем много новых интереснейших открытий и находок.



МАЛЕНЬКОЕ СОЛНЦЕ НА ЗЕМЛЕ

(ВМН, № 3-4, 2021)

На территории НИЦ «Курчатовский институт» работает цех, где производятся и тестируются сверхпроводящие кабели и для наших токамаков, и для международного проекта *ITER*.

Сотни тонн таких сверхпроводящих кабелей были изготовлены на предприятиях ГК «Росатом», а затем прошли тестовые испытания на площадке Курчатовского института перед их отправкой на юг Франции в Кадараш, где строится международный термоядерный реактор *ITER*. Это российский вклад — интеллектуальный и материальный. В основе этого международного мегапроекта — наш токамак, идея которого была предложена и воплощена впервые в мире в Курчатовском институте. А у истоков развития *ITER* на международной арене еще в 1980-е гг. стоял академик Е.П. Велихов, благодаря которому не только наша страна вступила в этот проект, но и было создано содружество России, США, Евросоюза и Японии для старта *ITER*. Позже к ним присоединились КНР, Южная Корея и Индия. По технологической и, можно сказать, идеологической сложности аналогов этому проекту в международном масштабе нет. Вклады стран распределяются равными долями между ведущими участниками. Мы поставляем туда технологии и готовые элементы. Ожидается, что на полную мощность реактор сможет заработать в 2035 г.

Проект *ITER* — это не просто создание новой технологии или установки, пусть даже мегауровня, а фактически переход к новым принципам овладения энергией, процессами, происходящими в звездах, когда при слиянии ядер изотопов водорода, дейтерия и трития выделяется огромное количество энергии. Подобного мы пытаемся добиться в проекте *ITER*. Повторю, что никогда раньше в мире не строили установок такой сложности. Человечество стоит на пороге ресурсного коллапса, но при этом наши потребности в энергетических мощностях будут постоянно возрастать. Очевидно, что для выхода из ситуации необходимо, во-первых, искать новые источники, во-вторых, снижать потребление. Так что термоядерная энергетика может стать альтернативой многим известным источникам энергии. К тому же сегодня из УТС развились сверхпроводимость, плазменные технологии, которые очень востребованы и в медицине, и в космонавтике.

Пока у нас нет очевидной альтернативы атомной энергетике, но мы понимаем, что топлива, на котором работают современные АЭС, урана-235, хватит на 50–70 лет. А что будет дальше? Сейчас серьезно рассматриваются проекты гибридного реактора, который сочетает в себе принципы ядерной и термоядерной энергетики, то есть сможет стать мостиком к переходу на новые принципы генерации энергии. По прогнозам экспертов, ближайшее десятилетие может стать решающим для реализации таких проектов. Крайне важно и то, что ресурсы топлива для термоядерной энергетики — дейтерия и трития — намного превосходят запасы нефти, газа, угля, урана на нашей планете. Дейтерия много в морской воде, а тритий достаточно легко можно получать из лития.

В обозримом будущем вопрос о новых источниках энергии вместе с нехваткой пресной воды станет ключевым для развития человечества. А, как я уже говорил, в основе термоядерной энергетики — природоподобные технологии, значит, это энергетика будущего. ■

Подготовила Ольга Беленицкая



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

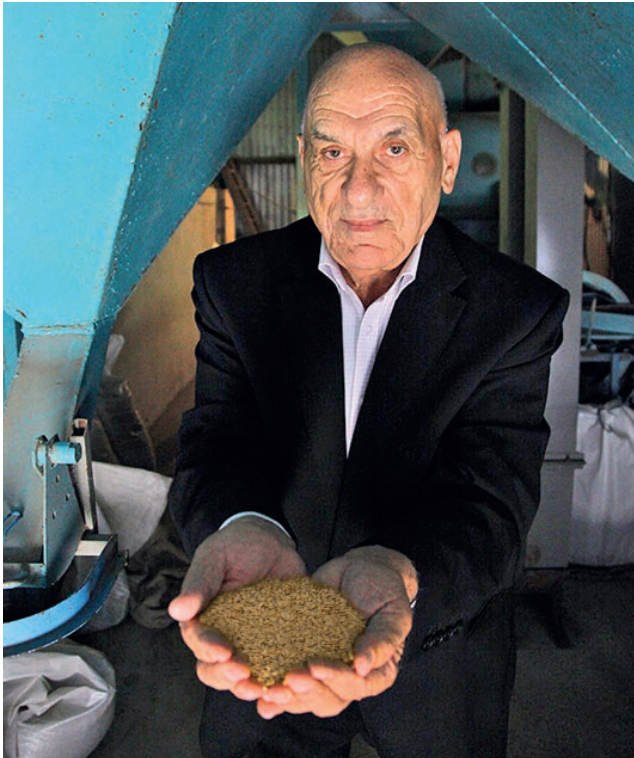
scientificrussia.ru

ДВЕ СУПЕРЗВЕЗДЫ «НЕМЧИНОВКИ»

**О СУДЬБЕ ВЕЛИКИХ
СЕЛЕКЦИОНЕРОВ
УНИКАЛЬНОГО
НАУЧНОГО ЦЕНТРА
РОССИИ**



Я часто проезжал по дороге, идущей между полями пшеницы. Останавливался. Любовался урожаем, потому что он всегда был обильным. Потом я узнал, что это поля «Немчиновки». А чуть позже судьба свела меня с двумя представителями этого знаменитого научного центра. Сначала это был **Николай Васильевич Цицин (1898–1980)**, советский ботаник, генетик и селекционер, академик ВАСХНИЛ и АН СССР, потом — академик **Баграт Исменович Сандухадзе**, заведующий лабораторией селекции озимой пшеницы и первичного семеноводства Московского НИИ сельского хозяйства «Немчиновка». Дистанция между этими встречами — более полувека. Тем не менее у моих героев оказалось много общего, ведь каждому из них пришлось начинать новый этап в истории легендарной «Немчиновки», которая только что отметила свой 90-летний юбилей.



Академик Б.И. Сандухадзе

Голод в Поволжье, Центральной России и Украине в начале 1920-х гг. забрал миллионы жизней, и надо было что-то предпринимать, чтобы в будущем избежать подобных катастроф. Спасти могла только наука, точнее, селекция сортов пшеницы, которые могли бы произрастать в тех районах России, где и почвы бедные, и морозы сильные. Появилось несколько исследовательских центров, где должны были работать ученые новой формации. Среди них был и студент Николай Цицин.

— Мне посчастливилось встречаться с И.В. Мичуриным, — вспоминал академик Н.В. Цицин. — Тогда я был еще студентом. Мичурин водил по своему участку, рассказывал о своей работе, показывал результаты. А когда прощались, он вдруг начал расспрашивать нас о том, чем занимаемся. Я признался, что вот уже два года пытаюсь вывести новый сорт пшеницы, но результатов пока нет. «Скрестить пшеницу с пшеницей всякий сможет, — сказал Мичурин. — Вот если бы найти для пшеницы сильного производителя, тогда другое дело...» Слова, сказанные вскользь великим селекционером, натолкнули меня на поиски такого растения. Пырей — дикий сорняк, обладающий необычайной природной силой и названный в народе «огонь полей», привлек

мое внимание. Однажды в совхозе «Гигант» я обнаружил не виданную мной ранее форму пырея. Вот тогда-то и появились первые пшенично-пырейные гибриды. Это случилось в Сальских степях.

— Лаборатория отдаленной гибридизации — одно из старейших научных подразделений института, — уточняет академик Б.И. Сандухадзе. — Инициаторы ее создания Н.В. Цицин и Г.Д. Лапченко впервые в мировой практике разработали оригинальный метод получения принципиально новых сортов озимой мягкой пшеницы — пшенично-пырейных гибридов. Этот метод селекции и последовавшие за ним практические результаты обогатили отечественную биологическую науку новыми открытиями и достижениями в развитии теории и практики межродовой гибридизации.

Академик Н.В. Цицин создал Лабораторию отдаленной гибридизации, а Б.И. Сандухадзе начал работать в ней старшим научным сотрудником в 1969 г., чтобы через десять лет ее возглавить.

ПРОФЕССИЯ — СЕЛЕКЦИОНЕР

В Нечерноземье всегда не хватало зерна для выпечки хорошего хлеба. Спасали те районы страны, где были черноземы. Понятно, что биологи и специалисты сельского хозяйства искали разные способы, чтобы исправить это положение. И, конечно же, надежды были связаны с озимой пшеницей.

Две революции в селекции пшеницы случились в «Немчиновке». Они связаны с именами Н.В. Цицина и Б.И. Сандухадзе, двух великих селекционеров XX и XXI вв. В беседах с обоими я интересовался, что же характерно именно для ученого-селекционера.

Н.В. Цицин ответил так:

— Творчество, которое требует постоянного поиска, нестандартных решений, умения находить «иголку в стоге сена» и всегда быть любознательным. На мой взгляд, труд селекционера настолько интересен и неповторим, что он всегда будет востребован. И сейчас, и через полвека... В общем, всегда!

А Б.И. Сандухадзе добавил:

— Селекция — это отрасль растениеводства. С ее помощью выводятся совсем новые сорта с качествами, которые в природе чаще всего не встречаются: продуктивность, устойчивость к болезням. Такие качества можно улучшать бесконечно. Об этом я говорю с высоты своего опыта работы с озимой пшеницей.

— **Это природа или разум человеческий?**

— Их единение. Мы работаем в довольно суровой зоне, и природа, как ни странно это звучит, мне помогает. Во время суровой зимы некоторые растения погибают, не выдерживают холода. Остаются крепкие, хорошие. Тем самым природа подсказывает, каким путем надо идти. И далее уже вступает в дело человеческий разум. Может быть, «хороших» растений окажется 100 или даже больше, но нужно отобрать именно то, которое станет родоначальником следующего сорта. Поэтому у нас селекционная работа в основном — это отбор и скрещивание. Я считаю, что селекция — это искусство.

— **Баграт Исменович, вы родились в Грузии?**

— Да. В Западной Грузии, Зугдидский район.

— **Но там озимой пшеницы нет.**

— Честно говоря, я не думал, что буду заниматься селекцией. В юности меня интересовали литература, история и философия. Вы удивитесь, но в шестом классе я дважды прочитал «Капитал» Маркса. Хотелось понять, как именно устроен мир. Но он был совсем другим, чем представлялось в книгах. Я ощущал себя гуманитарием, но в Тбилисский государственный университет не поступил. Мои школьные друзья поступали в сельскохозяйственный техникум, я заехал к ним. Посидели, поговорили. Меня приняли в техникум, окончил его с отличием, был направлен в Москву в Тимирязевку. В академии влюбился. Девушка

была библиотекарем. Мы поженились. Вернулся в техникум директором опытного хозяйства. Проработал там год. Одновременно преподавал растениеводство. Все складывалось хорошо. Однако жене не подошел климат — большая влажность, высокая температура. Врачи порекомендовали жить в центральной полосе России.

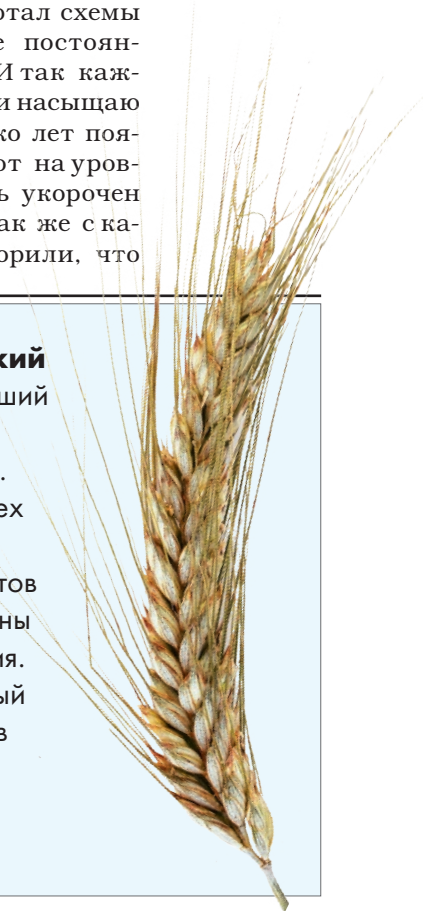
Еще во времена студенчества я дважды бывал в «Немчиновке», мы смотрели опытные поля. 3 августа 1963 г. я сюда приехал. Проработал два с половиной года в лаборатории озимой ржи. В это время «Мионовская 808» вытеснила все сорта нашего института, ни один из прежних пшенично-пырейных сортов не смог с ней конкурировать. Именно тогда я и решил серьезно заниматься озимой пшеницей. До 1979 г. мы ничего не могли противопоставить «Мионовской 808». Этот сорт давал больше других на десять центнеров! Единственный был недостаток — высокоурожайность. Иногда поля «лежали» до колосья. В результате — падение урожайности до нуля. Что делать? И тогда я начал «ремонт» этого сорта. Есть короткостебельные сорта, они не полегают, но очень плохо зимуют, сильно вымерзают. Как их сделать зимостойкими? Я разработал схемы селекции. Короткостебельные постоянно насыщаю мионовскими. И так каждый год: отбираю зимостойкие и насыщаю мионовскими. Через несколько лет появились линии, которые зимуют на уровне «Мионовской 808», стебель укорочен и урожай на 10–15 ц выше. А как же с качеством? В академии мне говорили, что



Академик Н.В. Цицин

Федеральный исследовательский центр «Немчиновка» — крупнейший

научно-методический центр сельскохозяйственной науки России. Сорта института возделывают во всех регионах Российской Федерации, кроме Крайнего Севера. На 67 сортов выданы патенты. Институтом получены авторские права на 143 изобретения. В институте сконцентрирован мощный научный потенциал: пять академиков и один член-корреспондент РАН, 28 докторов и 57 кандидатов наук.



все равно эту пшеницу можно использовать лишь как фуражное зерно. Мол, в таких климатических условиях (во время налива зерна холодно и дождливо) ничего у меня не получится. Но я решил попробовать преодолеть и эту проблему. Испытывал разные варианты. Не буду вдаваться в подробности, скажу только, что однажды иду вдоль делянки и вижу, что зерно на ней полностью стекловидное. Неужели получилось? Бегу в хлебопекарню, отдаю на исследование. Белка оказывается на 3–4% больше. Я не поверил, потому что в последние 40 лет вместе с ростом урожайности упало качество зерна. Вот такая закономерность, не только у нас, во всем мире. Урожайность выше, качество — ниже. А у меня наоборот! Фантастика! На следующий год все подтвердилось. У меня было всего восемь мешков. Одному знакомому председателю хозяйства в Ступинском районе я отдал четыре. Через три года он везет пшеницу на элеватор, в это время туда приходит машина из Ставрополя. Проводят анализы, выясняется, что наша пшеница намного лучше. Никто не поверил, что она выращена в Подмосковье!

— **Слух пошел в академии наук, что в «Немчиновке» случилось чудо и автор его — академик Б.И. Сандухадзе. Раскройте эту тайну.**

— Здесь действительно произошло важное событие — впервые был получен рекордный урожай озимой пшеницы. В сортоиспытаниях мы перешагнули рубеж в 100 центнеров с гектара, а отдельные номера дали 133,7 центнеров. В Подмосковье

земли очень бедные, мало вносится извести, органических удобрений. И на таких землях мы получили отменный урожай.

— **И в чем же секрет успеха?**

— В селекции.

— **Многие зарубежные ученые в Канаде и Германии не верят, что в Подмосковье можно получать такие урожаи.**

— Я им говорю: приезжайте, посмотрите. За последние 40 лет резко упало качество зерна. Это проблема номер один во всем мире. Как сочетать высокий урожай с высоким качеством зерна? Мне только что из лаборатории принесли данные о белке. У наших сортов, которые дали по 120–130 центнеров с гектара, процент белка — 14,7–14,8. Это выше международного стандарта.

Наша страна должна гордиться не только космическими конструкторами и создателями атомной промышленности, но и великими селекционерами, такими как П.П. Лукьяненко, В.Н. Ремесло, И.Г. Калинин и многие другие. И сейчас работают прекрасные ученые, специалисты высочайшего класса, но их имена широкой общественности неизвестны. Заверяю вас, в разных районах страны есть прекрасные селекционеры. Почему именно на них я концентрирую ваше внимание? А дело в том, что селекция — самый дешевый способ поднятия урожайности сельскохозяйственных культур.

— **Сегодня это звучит сверхактуально.**

— Чтобы в наши дни получить хороший урожай, нужны сорт и техногенные факторы. Сорт — это дешево. Приехал ко мне специалист, заплатил копейки и получил

За почти 90 лет учеными Федерального исследовательского центра «Немчиновка» было создано 170 сортов зерновых и зернобобовых культур, 94 из них представлены сегодня в Государственном реестре селекционных достижений, допущенных к использованию. На 67 сортов выданы патенты. В целом сорта культур немчиновской селекции возделываются в регионах России на площади свыше 8 млн га, обеспечивая до 20% общероссийских валовых сборов зерна.



четыре мешка зерна. Он размножает их, и это ему ничего не стоит. А техногенные факторы — это уже миллиарды.

— **Что такое «техногенные факторы»?**

— Это защита растений, пахота, удобрения — все, что сопутствует росту растений и их урожайности. Однако у этих факторов есть предел возможностей. Например, они не могут обеспечить зимостойкость, устойчивость к болезням.

— **А химия?**

— С ее помощью можно кое-чего добиться, но следует помнить об экологии. Почвы перенасыщены вредными веществами. На Западе это давно знают, а потому буквально завалили нас разными веществами, которые уже многие годы не приносят пользы. Мы же выводим сорта, которым не нужно никаких препаратов. У меня появились сорта, которые я абсолютно ничем не обрабатывал перед посевом. И, представьте, мучнистой росы нет, ржавчины нет, других болезней нет... Качество зерна очень хорошее. Хлеба не полегают, что очень важно.

Мы сейчас создаем сорта, у которых несколько десятков признаков. Главные: урожайность, качество зерна, устойчивость к болезням. По урожайности — причем не только в этом году, но и уже четыре года подряд — 110–120 центнеров с гектара. А что было 40 лет назад? 45–50 центнеров.

Кстати, некоторые фермеры в Англии получают сейчас 150 центнеров с гектара. У них условия получше, чем у нас. Но я поставил себе цель не только догнать их, но и получать до 200 центнеров с гектара.

— **Фантастика?**

— Она должна стать реальностью.

Может показаться, что мой собеседник несколько преувеличивает, — есть же пределы и человеческих возможностей, и селекционной работы. Наверное, с этим следовало бы согласиться, если бы не работы предшественников Б.И. Сандухадзе и его самого. В одной из своих научных работ академик цитирует выдающегося ученого Н.И. Вавилова: «Ни по одному растению не проведено столь обширной селекционной работы, как по пшенице. На примере пшеницы можно видеть наглядно современное состояние теоретической селекции и генетики, можно проследить пути современной селекционной работы <...>. Тысячелетия над пшеницей сознательно и бессознательно работали поколения селекционеров». И заключает: «Современные сорта озимой пшеницы селекции НИИСХ ЦРНЗ в начале XXI в. занимают миллионы гектаров во всех областях Центрального Нечерноземья, тогда как в начале XX в. возделывание этой культуры имело очаговый характер».

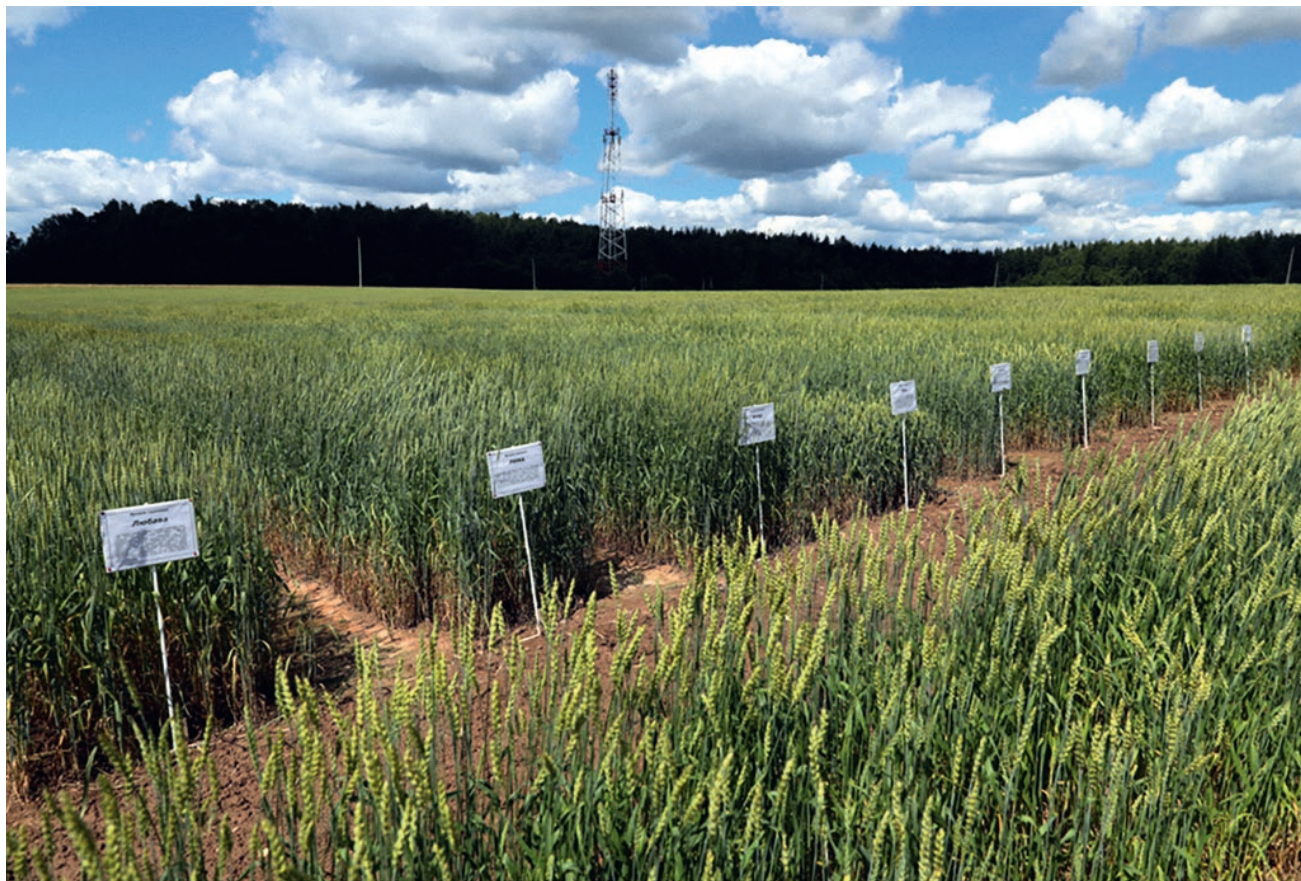
Портрет Н.И. Вавилова висит в кабинете академика Б.И. Сандухадзе, и он по праву считает себя одним из учеников великого ученого.

ИСТОКИ СОЗДАНИЯ НОВОГО СОРТА

Академик Н.В. Цицин тоже считал себя учеником великого Вавилова. Но открыто признаваться в этом не мог — ведь в начале его исследований в стране царил лысенковщина. Сразу после печально



1. Посевы озимой тритикале сорта «Немчиновский 56».
2. Академик Ю.Ф. Лачуга.



Конкурсное испытание новых сортов яровой пшеницы

знаменитой сессии ВАСХНИЛ 1948 г. для генетиков и селекционеров наступили тяжелые времена. Приходилось хитрить и лавировать, чтобы идти намеченным путем. Особенно трудно было селекционерам «Немчиновки» — ведь большинство из них не разделяли взглядов Т.Д. Лысенко.

— Вам приходилось контактировать с Лысенко?

— Постоянно. Он старался контролировать всех селекционеров. Но мне было легче — я стал директором Главного ботанического сада Академии наук СССР. И были экспериментальные поля в «Снегирях». Там я был хозяином. А селекция — дело долгое, трудоемкое...

— От первого опыта, первого успеха до появления сорта — большая дистанция?

— Так и было. Прошло много лет, прежде чем мы сдали в государственное сортоиспытание новые сорта. Это «Восток», «ППГ-48» и другие. Освоение новых сортов идет постепенно. Вот, например, «Восток». В 1963 г. в Кустанае было высеяно 2 тыс. гектаров, а в 1964 г — уже 20 тыс.

— И как часто появляются новые сорта?

— Ежегодно можем сдавать один-два сорта. И ничего странного в этом нет. У нас в «Снегирях» апробируются сотни готовых «кандидатов», и вполне естественно, что каждый год рождаются новые сорта. Много лет назад шли разговоры о том, чтобы селекционеры выводили сорт за два-три года. Я уверен, что создать по-настоящему хороший сорт за это время невозможно. Иногда нужно работать десятки лет. И у селекционера должен быть конвейер, а потому главное — задел. В селекции подчас происходят удивительные вещи! Хотите еще одно «чудо»? Вот колос, похожий на метелку пырея. Да, он невзрачный на вид, но если у обычной пшеницы зерна белые, рыхлые, то у этой плотные, зеркальные. Они чем-то напоминают алмазную крошку. Я назвал этот сорт «усатая пшеница», очень уж мягкие у нее «усы»... Если высевать три с половиной центнера зерна на гектар, то на поле вырастает зеленая щетка. Она закрывает землю, сорняки забиваются, гибнут. Урожай очень высокий!



1. Зерно нового урожая озимой пшеницы.
2. Посевы озимой тритикале «Капелла».



КАКОЕ НАС ЖДЕТ БУДУЩЕЕ?

Коллеги по академии наук по достоинству оценили труд Б.И. Сандухадзе. Ему была присуждена престижная Демидовская премия.

— Каждый год я высеваю около 120 сортов, смотрю, какое зерно, как вызревает, как развивается, — говорит Б.И. Сандухадзе. — Чтобы получить хороший результат, надо взять у разных сортов все лучшее и перенести эти качества в новый сорт. Работа, конечно, кропотливая, но совершенно необходимая для селекционера. Буквально каждое зернышко нужно рассмотреть, изучить, определить его будущее. И это нужно делать постоянно, из года в год. Ведь обычно сорт держится пять лет, а потом его надо менять, так как появляется ржавчина. А у меня сорта, которые живут уже 30 лет. Ни у одного селекционера в мире нет ничего подобного. Четыре месяца на полях лежит снег. Но зимой мы не отдыхаем. Я выращиваю еще один урожай пшеницы, посеял ее в сентябре в горшках. На улице проходит яровизация, а 20 ноября я занесу горшки в теплицу. В середине января получаю новый урожай. 18–20 февраля сею в «поле» — там у меня подогрев, потом тепло отключаем, когда на улице три-четыре градуса — идет яровизация. Это уже весна, апрель. Мы получаем второй урожай. В других странах у селекционеров есть возможность совершать такой круговорот два-три раза. Ведь чем больше поколений, тем больше получаем хороших свойств — идет насыщение нужных признаков. В общем, удалось ускорить ход селекции вдвое, и это чрезвычайно важно для тех условий, в которых нам выпало работать.

— **И все-таки очень интересно: как случаются открытия?**

— Убираю с 15 делянок урожай — все привычно, нормально. И вдруг на 16-й делянке вижу «стекловидное» зерно — необычное, крупное. Душа возрадовалась — ясно, что в моем распоряжении нечто очень хорошее, важное, перспективное. Я сразу рванул в лабораторию, чтобы определить белок и качество. Удача! На следующий год все подтверждается — значит, рождается сорт.

Я создал новый сорт, назвал его «Немчиновская 17». Он абсолютно устойчив к полеганию, у него очень хорошее качество зерна. Недавно мне позвонили из Воронежской области и сообщили, что такого качества зерна у них еще не было. Продовольственным зерном хорошего качества можно полностью обеспечить людей. Причем мы не заражаем землю разными химическими веществами. Мы сеем пшеницу, а она не всходит. Дело в том, что на землю обрушивается огромная нагрузка из пестицидов и почва уже не выдерживает. У нас же земля сохраняет свою исконную сущность, главную ценность — плодородие. Такое впечатление, будто сам сорт о своей земле заботится, не позволяет ей истощаться.

— **Но рядом с вашим институтом я видел поле, заросшее бурьяном.**

— Эту землю у нас отняли. Ни одного метра нам здесь не оставили. Вот она и заросла бурьяном. Я просил хотя бы на год мне ее отдать. Нет, не разрешили. Дали нам землю возле Внукова, но и ее сейчас отнимают. Требуют, чтобы мы платили налоги. Более 100 млн нам насчитали. Угрожают: если не заплатим, то счета закроют.

— Как известно, ваши поля забраны под Сколково. И сколько вам заплатили за это?

— Ничего не заплатили. Забрали поля — и все! Если бы я был частным селекционером и имел бы два-три гектара где-нибудь на Западе, то давно был бы миллионером. А мы работаем на государство. Точнее — на многочисленных посредников, которые, подобно сорнякам, разрослись на наших полях в несметных количествах. Власть призывает наших крестьян каждый год: сейте! Но ограничивается только призывами. Крестьянин не знает, что получит осенью. Это с бразильскими и иными фермерами заключаются договоры, в которых все расписано до копейки. У нас же такого нет — крестьянин работает в темноте, не только в прямом смысле этого слова, но и в переносном. Власть должна навести порядок в этой области, и тогда у нас будет изобилие не на словах, а на столах.

— О чем вы мечтаете?

— Получать 150 центнеров с гектара. Цифру 144 я уже зафиксировал. Я с детства работал в поле — выращивал сою, кукурузу. Тогда мне было восемь лет и шла война.

Мы работали от зари до зари. Эта привычка осталась на всю жизнь. Честно говоря, меня удивляет, когда люди появляются на делянках в разгаре утра, ближе к обеду, чем к рассвету. Так работать в сельском хозяйстве нельзя!

— А почему так трудно работать именно с пшеницей?

— У нее 130 тыс. генов. У «папы» — 130, столько же у «мамы». Различные комбинации дают разные результаты. А количество комбинаций бесчисленно — вот почему у селекции нет границ. Надо постоянно быть в поиске.

— Создается иллюзия, что вы легко прошли по научной лестнице вверх: пришли сюда, пристрастились к селекции — и все у вас пошло хорошо.

— Эх, если бы это было так! В мире есть четкое представление о селекции и селекционерах. Это особый мир, который живет по своим законам. Главное — опыт. За первые 20 лет, что я работал здесь, я ничего не вывел. А потом начал допускать меньше ошибок в исходном материале. Где-то к 60 годам я набрал форму, по-настоящему стал селекционером. А если посмотреть



1. Академики Ю.Ф. Лачуга, Г.И. Карлов, П.Н. Харченко и директор Федерального исследовательского центра «Немчиновка» С.И. Воронов (слева направо).



2. Если делать все по науке, то даже в трудных погодных условиях Нечерноземья можно получать щедрый урожай. Доказательства — на опытных полях «Немчиновки».



3. Академик Б.И. Сандухадзе в посевах озимой пшеницы.

на других ученых, то мы легко убедимся, что молодых крупных селекционеров просто нет. Возраст для селекционера — важная составляющая. Отчасти это можно сравнить с медициной. Вас привезли на операцию, и вы, конечно же, доверитесь тому хирургу, который оперировал много, а не новичку. Опыт для ученого — это гарантия того, что он найдет верный выход из любой ситуации. Когда я публично выступаю, то говорю: если селекционер может ходить, не трогайте его, а помогайте.

— **Чиновники нынче считают иначе: мол, ученых преклонного возраста нужно отправлять на пенсию...**

— Они ошибаются. По крайней мере, в отношении селекционеров. С таким подходом к нашей области науки мы останемся без новых сортов, а следовательно, без хорошего сельского хозяйства. Для селекции очень важно знать, что происходит в мировой науке. Надо внимательно следить за тем, как работают коллеги. Можно вывести хороший сорт, но где-то есть лучше — значит, этим нужно обязательно воспользоваться. Надо собирать коллекции сортов и их использовать. Свои сорта нужно обогащать новыми генами, и тогда успех обязательно придет. Каждый год я высеваю около 350–400 коллекционных номеров из Америки, Франции, Канады, Германии, Турции, других стран. Изучаю эти сорта, выбираю лучшие, и те признаки, которых не хватает нашим сортам, стараюсь им придать. Это кропотливая работа, но абсолютно необходимая.

— **И вы даете коллегам из других стран свои сорта?**

— Конечно. Это плодотворное сотрудничество, и связи у нас обширные. Опыт у меня большой, а потому сейчас ежегодно я могу давать два-три сорта. Конечно, испытания и отправка материалов отнимают много времени, но делать это нужно.

— **В вашей лаборатории много сотрудников?**

— Шесть человек. Из них четверо с большим пенсионным стажем. Это очень



Сортовые посе́вы ячменя и овса

ценные сотрудники. И двое-трое молодых. Но поверьте, не от количества сотрудников зависит селекция, а от умения наблюдать и видеть в мире природы то, что вам необходимо. Если это происходит, то ученый состоялся. А возможности у нас большие.

— **Что вы имеете в виду?**

— Нашу страну — Россию. Сейчас мы получаем 100 млн т зерна. Наши ученые и специалисты способны удвоить урожай, у них есть такие возможности. А через 10–15 лет — утроить. Для этого необходимы усилия правительства и властей всех уровней. Сейчас в мире производят порядка 650 млн т зерна, а нам по силам производить половину этого количества.

— **Звучит фантастически.**

— Сегодня мы занимаем пятое место по производству зерна. Впереди Канада, Германия, Франция, Америка. А мы можем быть первыми. У нас огромные массивы земли, на ней можно использовать новую технику и благодаря этому производить самое дешевое зерно в мире.

— **Мечты?**

— Это не мои слова, а одного из руководителей Всемирного валютного фонда, и слышал я их не здесь, а в Германии на одном из конгрессов по хлебу. И он прав. Природные условия России позволяют нашей стране быть лидером по зерну. ■


Подготовил Владимир Губарев



СЛОМАННЫЕ ГЕНЫ : *рак* *по наследству*

A pink awareness ribbon is draped across the middle of the page, partially overlapping the title text. The ribbon is a vibrant pink color and has a textured, woven appearance. It forms a large, flowing loop that spans across the width of the page.

Анализ опухоли каждого конкретного онкологического пациента и формирование индивидуального перечня потенциальных молекул-мишеней стали возможными благодаря внедрению методик молекулярно-генетического анализа в клиническую практику. Об этом нам рассказал член-корреспондент РАН Евгений Наумович Имянитов, руководитель отдела биологии опухолевого роста Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н.Н. Петрова в Санкт-Петербурге.



Ежегодно 15 октября отмечается Всемирный день борьбы против рака молочной железы. Розовая лента — символ этой глобальной кампании.

— В одной из своих лекций вы рассказывали о древнем египетском папирусе, в котором содержится информация о нескольких пациентах с раком молочной железы и предлагают методы лечения. Неужели рак был и остается с человеческой цивилизацией всегда?

— Несомненно. Практически любой многоклеточный организм имеет встроенные механизмы регуляции количества клеток. И, разумеется, есть те или иные процессы, которые нарушают нормальную работу механизмов регуляции. Поэтому у каждого многоклеточного организма рано или поздно появляются опухоли.

— Распространено мнение, что рак «молодеет» и все больше молодых людей подвержены этому заболеванию. Насколько верно это утверждение?

— Я думаю, неверно. Здесь мы сталкиваемся с изменением статистики. Когда мы говорим о распространении того или иного заболевания, мы должны ответить на главный вопрос: насколько прецизионна его диагностика? Например, рак молочной железы — самое частое заболевание у женщин. В середине 1970-х гг. появился новый метод диагностики — маммография, то есть рентгеновское обследование молочных желез. С тех пор частота заболевания выросла



Член-корреспондент РАН Е.Н. Имянитов

в два с половиной раза. Это не значит, что женщины стали чаще болеть. Это значит, что маммография позволила выявлять те формы, которые раньше не диагностировались.

Это же справедливо для опухолей почки. До появления ультразвукового обследования не было такого количества соответствующих диагнозов. Поэтому современная статистика онкозаболеваний — во многом результат улучшенной диагностики.

Это касается не только молодых возрастных групп, но и пожилых. В нашей стране человек старше 90 лет — это большая редкость, честно говоря. И я не побоюсь сказать, что многими очень пожилыми людьми диагносты занимаются по остаточному принципу. Просто потому, что зачастую очень пожилые люди слишком дряхлые, чтобы всерьез их обследовать. Между тем сегодня колоссально выросла продолжительность жизни. В США, например, то, что люди живут больше 90 лет, — это норма, поэтому и эту возрастную группу диагностируют активно. Показательный пример: у одного из бывших президентов США Джимми Картера на 94-м году выявили опухолевый процесс в головном мозге, который успешно лечили.

— Всегда ли рак — наследственное заболевание?

— Прежде всего важно определиться с терминами. Наследственное заболевание — это

предрасположенность к заболеванию, передающаяся по наследству. Как правило, рак — не наследственное заболевание. Но та или иная мутация наследуется на уровне клетки. С этой точки зрения рак — это нарушение ДНК, и раковая клетка, несомненно, порождает другую раковую клетку. Поэтому с позиции биологии опухолевого роста рак — это наследуемое событие.

— Ваша работа связана в том числе с внедрением так называемой молекулярной диагностики онкологических заболеваний. В чем суть этого метода?

— Молекулярная диагностика представляет собой анализы, которые так или иначе связаны с исследованием генетического кода. В первую очередь, речь идет о диагностике наследственных мутаций, а также мутаций непосредственно в опухолях, которые ассоциированы с ответом на тот или иной лекарственный препарат. Мутации также рассматриваются как маркеры присутствия опухоли в организме. Помимо этого, востребована диагностика опухолей с невыявленным первичным очагом. То есть метастазы есть, но из какого органа они происходят, неизвестно. Здесь может помочь молекулярная диагностика.

В целом, когда мы говорим про наследственный рак, речь идет об унаследованном генетическом событии, которое фатально увеличивает риск развития определенного типа опухоли. Известен пример актрисы Анджелины Джоли, которая унаследовала мутацию, ассоциированную с фатальной предрасположенностью к раку молочной железы и яичников. Именно поэтому она приняла решение провести стандартную для западных стран процедуру — профилактическую операцию. Известно около 60 генов наследственного рака. Молекулярная диагностика позволяет выявить людей, находящихся в группе риска и требующих наблюдения.

Существуют также опухоли, у которых благодаря соматической мутации появилась молекулярная мишень. Создан целый ряд препаратов, которые воздействуют на мутированные киназы и уничтожают опухолевые клетки. К сожалению, таких мишеней мало. Но для отдельных пациентов подобная терапия — очень существенная, иногда десятикратная, прибавка к продолжительности жизни.

Разрабатываются методы ранней диагностики рака. Идея состоит в том, что опухолевые клетки при распаде выделяют опухолевую ДНК в кровоток. Некоторые методы

молекулярной диагностики — полимеразная цепная реакция, секвенирование нового поколения — обладают уникальной чувствительностью. Они могут выявить единичную мутированную копию в присутствии избытка нормальных молекул ДНК.

— Научное сообщество часто говорит о значимости скрининга. Применяются ли здесь генетические технологии?

— При обсуждении скрининга нужно принимать во внимание научную информацию. Я не зря упомянул рак молочной железы. Да, с внедрением рентгеновских технологий выявляемость рака молочной железы выросла в два с половиной раза, при этом выявляемость поздних стадий рака молочной железы не уменьшилась ни на йоту. Это означает, что мы выявляем только те онкологические случаи, которым не суждено стать запущенными и причинять вред человеку.

С раком простаты другая ситуация. В данном случае скрининг простатического антигена привел к тому, что увеличилась выявляемость ранних стадий рака и снизилась выявляемость поздних стадий.

Сегодня важен такой показатель, как продолжительность жизни онкологического пациента: только с учетом этого параметра можно обсуждать целесообразность скрининга.

— Можно ли выявить сразу несколько рисков по тем или иным видам опухолей в одном генетическом тесте?

— На самом деле сочетания разных рисков встречаются редко. Как правило, речь идет об одном гене.

— Если говорить о методах лечения, которые применимы сегодня, от чего зависит успешный исход лечения для тех людей, у кого есть наследственные онкологические заболевания?

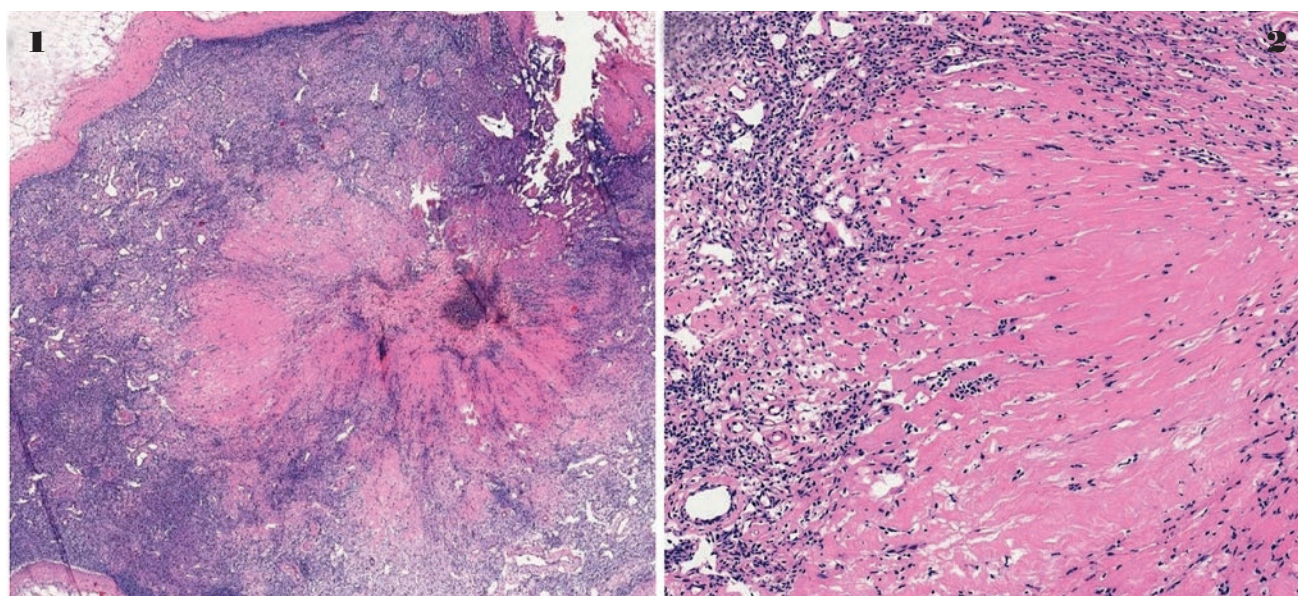
— Отмечу, что наследственные заболевания нельзя объединять в одну группу, потому что у разных пациентов выявляются разные синдромы, соответственно, отличаются и подходы к лечению. Так или иначе, во многих случаях успех лечения рака определяется тем, насколько своевременно поставлен диагноз. Далее все зависит от конкретных видов рака и правильно подобранной тактики лечения — хирургического вмешательства и терапевтических воздействий.

— То есть в каждом случае важен некий индивидуальный подход?

— Как и во всех областях медицины. Еще Гиппократ об этом говорил.

— Как человек может самостоятельно просчитать риски развития онкологических заболеваний? На что необходимо обращать особое внимание?

— Значимый фактор наследственной предосторожности — случаи онкологических заболеваний у членов семьи до 50 лет. Это косвенный признак, и он, разумеется, не сравнится с ДНК-диагностикой. Тем не менее это один из показателей, на который стоит обратить внимание здоровому человеку.



Репрезентативные изображения полной регрессии опухоли в подмышечных лимфатических узлах. В центре лимфатического узла наблюдается область фиброза (1). Участок фиброза при большем увеличении (2). Источник: Nature.

— В 2018 г. профессор из Китая объявил, что ему удалось отредактировать геном человека. Хэ Цзянькуй утверждал, что родившиеся девочки обладают иммунитетом против ВИЧ. Если говорить об онкологических заболеваниях, будут ли применяться методы изменения генома человека в обозримом будущем?

— Я не думаю, что в обозримом будущем появится метод абсолютно безопасного изменения генома, исключающего любые побочные эффекты. Существующие сегодня методики геномного редактирования чреваты заметными рисками. Зачастую подобные манипуляции вызывают особый вид хромосомной нестабильности и ряд других опасных мутаций.

Поэтому я скептически отношусь к краткосрочным перспективам медицинского применения геномного редактирования для предотвращения наследственных заболеваний и очень серьезно подхожу к вопросам безопасности человека после таких вмешательств. А исправить опухолевую клетку и сделать ее нормальной вообще невозможно. Ее можно только уничтожить.

Среди наиболее реалистичных и эффективных манипуляций — изменение свойств отдельных клеток человека: скажем, лимфоциты становятся более жизнеспособными или клетки поджелудочной железы начинают продуцировать инсулин, которого не хватает. На мой взгляд, это более жизнеспособная методика в краткосрочной перспективе.

— Вам с коллегами удалось обнаружить новый ген наследственного рака молочной железы. Сколько их может быть? И как ведутся поиски?

— Сегодня известно примерно 10–12 генов наследственного рака молочной железы. Ген, найденный нами в 2012 г., был в то время пятым или шестым по счету.

Какова была идея исследования? Мы работали с женщинами, у которых очевидно была предрасположенность к раку: например, мама или сестра болели в молодом возрасте. При этом в известных генах повреждений нет. Тогда берутся новые гены, которые по своей функции аналогичны уже известным (*BRCA1*, *BRCA2* и другим).

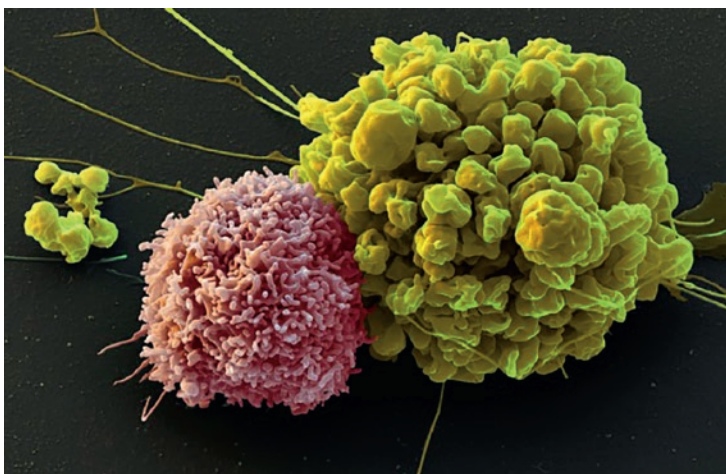
Поиск новых генов, ответственных за развитие рака молочной железы, был основан на анализе генов, задача которых — исправлять повреждения ДНК. Ведь практически все гены рака молочной железы — это мутированные гены репарации ДНК, которые работают неправильно либо не работают вовсе. Найденный нами ген *BLM* тоже отвечает за репарацию ДНК, а его мутация приводит к наследственному раку молочной железы.

— Над чем вы и ваши коллеги из Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н.Н. Петрова работаете сегодня?

— Я возглавляю отдел биологии опухолевого роста в НМИЦ онкологии им. Н.Н. Петрова и кафедру общей и молекулярной медицинской генетики в Санкт-Петербургском педиатрическом медицинском университете. В нашем коллективе работают не только онкологи, но и представители медицинской генетики как таковой. Замечательно, когда в одной команде сотрудничают специалисты разного профиля.

Если говорить о направлениях, то когда я приходил в молекулярную биологию, она формировалась как очень далекая от медицины наука — как наука о механизмах фундаментальной биологии. За эти годы многое изменилось, но мы и сегодня продолжаем изучать механизмы заболевания в целом, в том числе и механизмы рака — эта область деятельности обычно называется фундаментальными исследованиями. Меня, как и других сотрудников центра, очень интересуют те аспекты, которые принято называть трансляционными. Речь идет об исследованиях, которые могут принести пользу практической медицине: способы диагностики различных заболеваний, новые методы лечения.

Результаты фундаментальных или прикладных исследований должны подвергаться экспертизе мирового сообщества. Еще в конце 1980-х гг., когда я поступил

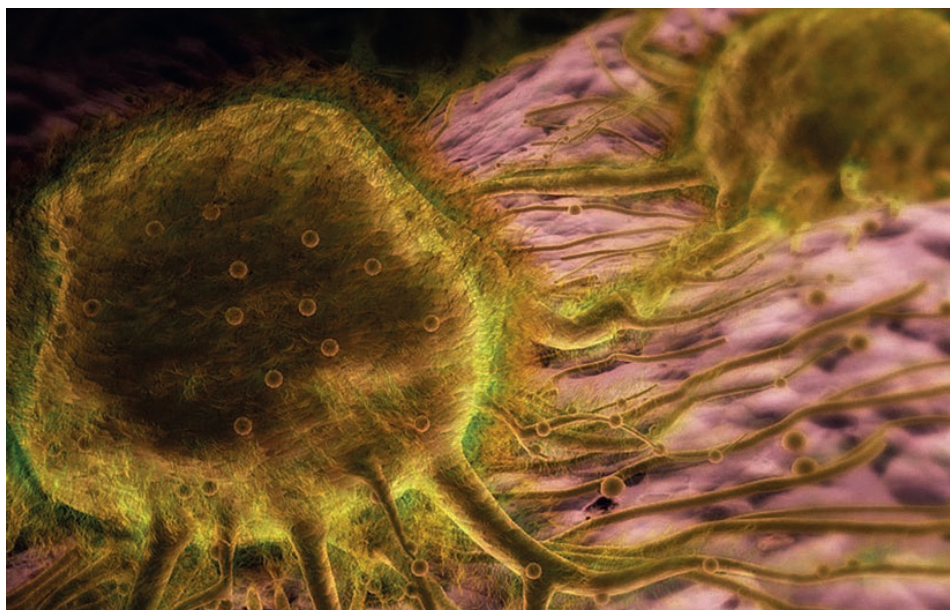


Лимфоцит-киллер (розовый) атакует опухолевую клетку (желтая). Источник: Eye of Science / SPL.

Таргетная терапия

эффективна для лечения опухолей молочной железы, в которых наблюдается активация гена HER2.

Источник: MedicalRF.com / Getty Images.



в аспирантуру, меня смущало, что исследовательская работа не проходит международную экспертизу, а научные статьи публикуются на русском языке. Мне всегда это казалось странным, и я очень много усилий потратил на то, чтобы научиться работать на мировом уровне. Соответственно, мы с точки зрения пресловутой публикационной активности отличаемся от многих организаций, поскольку стараемся представлять результаты нашей работы на международную экспертизу научного сообщества.

В этом контексте значим и вопрос подготовки кадров. Важно привлекать студентов к научной работе сразу, пока они совсем молодые. Такой специалист по завершении обучения уже будет иметь опыт работы в науке.

— **Много ли к вам приходит молодых студентов и ученых?**

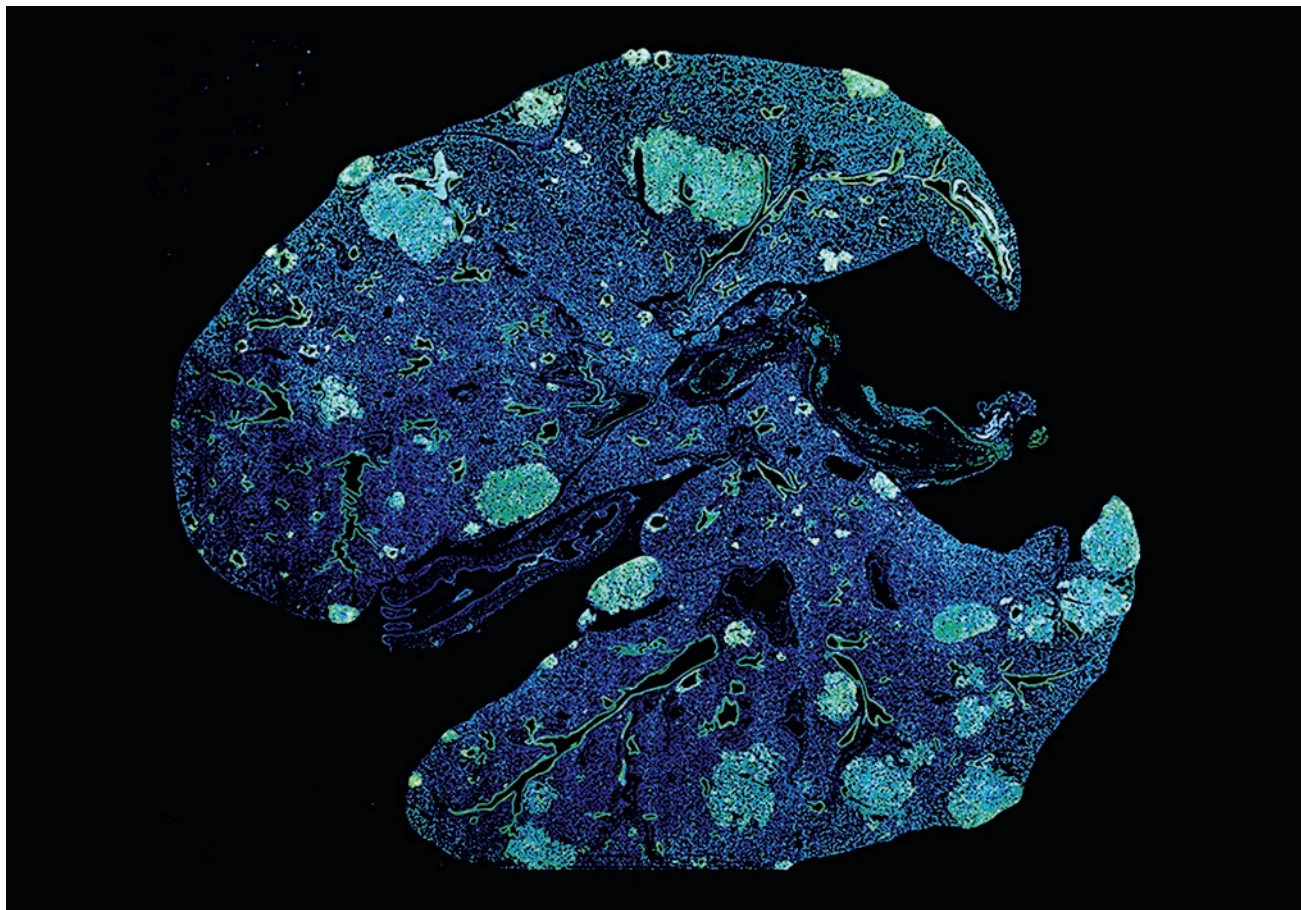
— Да, у меня много студентов. Но, конечно, кадровый вопрос стоит достаточно остро. Как мне кажется, в России нет последовательной кадровой политики в отношении медико-биологических дисциплин. Это направление долгое время оставалось в сознании многих занятием для чудаков. Специальных учреждений было мало, а исследования воспринимались как второстепенные — за исключением микробиологии и инфекционных заболеваний. Неслучайно российским ученым удалось так быстро создать вакцину от коронавируса: ведь была критическая масса специалистов, чью деятельность считали очень важной еще во времена Советского Союза.

По другим медико-биологическим дисциплинам количество отечественных специалистов существенно отличается от числа таких ученых в других странах. Нарастивать их количество политикой большого скачка невозможно, потому что каждый специалист, такой как я, может подготовить достаточно ограниченное количество других ученых. Это все-таки не конвейер, а научная школа.

Поэтому, я думаю, прежде чем ставить амбициозные задачи для страны, необходимо планомерно пытаться увеличивать число специалистов.

Я сам часто спорю с чиновниками по поводу базового финансирования, которое очень маленькое, а вся научная деятельность построена на грантах. Это похоже на лотерею. Я считаю, что в этой ситуации необходимо создавать стабильную финансовую прослойку для обеспечения научных групп зарплатой, оборудованием и расходными материалами. Вроде бы есть желание и политическая воля увеличить эффективность этого сектора, но существующий уровень проработки явно требует улучшений.

Другая негативная, на мой взгляд, тенденция связана с тем, что постоянно создаются новые лаборатории и новые научные центры. Меня это очень беспокоит, поскольку складывается такое ощущение, что нам проще закрыть действующую лабораторию, а на ее месте организовать новую с другим названием. Нам важно научиться эффективно использовать то, что уже наработано. Это, конечно, предметный вопрос, и его нужно обсуждать с организаторами науки.



Легкое мыши с метастазами (зеленые) рака молочной железы. Источник: Рокфеллеровский университет.

Более того, научное сообщество ведет постоянный болезненный спор вокруг того, что считать нужной или ненужной наукой. Суть в том, что фундаментальная наука у многих ассоциируется с фразой «что хочу, то и делаю». Это в корне неправильно. У фундаментальной науки всегда есть определенная задача. Например, я занимаюсь фундаментальной онкологией. И эта тема не просто мне любопытна. Я исследую механизмы возникновения опухоли, чтобы в конечном счете найти лекарство против рака. Важно, чтобы и фундаментальная наука имела некую дорожную карту, чтобы и ученые, и организаторы науки, и рядовые граждане понимали, какую пользу могут принести подобные исследования.

С другой стороны, меня пугает, что прикладные исследования сводятся к патентам и заработку. Во всех странах медицина разрабатывает новые способы лечения. Какая здесь может быть выгода? Скажем, мы опубликовали работы, которые говорят об эффективности уже известных

препаратов — цисплатина и митомицина — в лечении наследственного рака. Как я могу это запатентовать и продавать? Медицина так не работает. В медицине значимость определяется тем, что мы смогли вылечить пациента.

Не хочу брюзжать и выступать в роли критикана, но меня расстраивает, что нашей деятельностью зачастую больше интересуются журналисты, а не организаторы науки, тогда как в этой сфере важен диалог с представителями профильных ведомств и министерств.

Возвращаясь к вопросу кадрового потенциала: важно научить писать все заявки и рецензии только на английском языке. Тогда сразу отсекутся те, кто не может работать на мировом уровне. А те, кто может, будут вынуждены либо выучить английский язык, либо взять в группу тех, кто им владеет.

— **В контексте международного сотрудничества с какими зарубежными лабораториями вы работаете? И как происходит обмен по вашей тематике?**

— Начну с того, что еще 15 лет назад у нас не было ни оборудования, ни реактивов, поэтому сотрудничество активно развивалось просто в силу невозможности проводить исследования в России. Это была, скорее, зависимость, а не реальное взаимодействие. Сегодня, к счастью, ситуация изменилась — и зависимости нет вовсе.

Моя лаборатория входит в состав консорциума по изучению наследственных видов рака. Участники консорциума постоянно публикуют совместные результаты. У нас налажены контакты с коллегами из Польши, Германии и других стран. Хорошо и то, что это сотрудничество в целом поощряется.

— Онкологи всегда оставались неким авторитетом для общества. Могли бы вы дать несколько советов нашим читателям: как уберечь себя от возможных рисков возникновения онкологических заболеваний?

— Первое и самое главное — вести здоровый образ жизни. Прежде всего, отказаться от курения. Известно, что около 30% случаев онкологических заболеваний вызвано регулярным употреблением табачных изделий. Во-вторых, важно следить за весом. Вообще бич современной цивилизации — избыточный вес. Фактически каждый человек после 40 лет имеет 10–15 лишних килограммов, и все чаще это наблюдается и среди молодых людей. Это плохо, потому что лишний вес значительно увеличивает риск развития сразу нескольких видов рака. Понимаю, что контроль веса — мучительное занятие, но этим нужно заниматься.

Третий неблагоприятный фактор — неосторожное загорание. Людям с белой кожей абсолютно противопоказано загорать на солнце до красноты.

Помимо этого, важно понимать, что, например, рак шейки матки — абсолютно предотвратимое заболевание. Главное — избегать появления инфекций, которые передаются половым путем, в частности вируса папилломы человека. Регулярный гинекологический скрининг очень помогает ранней диагностике рака шейки матки. В России, к сожалению, ситуация неблагоприятная. Встречаются многочисленные случаи запущенных стадий данного заболевания, тогда как в развитых странах такие формы выявляются реже — просто за счет скрининга.

Если говорить о ранних симптомах рака, то, например, рак молочной железы проявляется в виде уплотнений в области груди.

Рак легкого — в виде кашля и частых пневмоний. Среди первых симптомов рака желудка, как правило, непроходимость пищи после глотания. О развитии рака толстой кишки сигнализируют черный стул или признаки крови в нем. В целом, к врачу необходимо обратиться, если наблюдаются неожиданная утомляемость, необъяснимое снижение веса, повышение температуры по вечерам до 37,5 градусов.

Если появились перечисленные симптомы, необходимо прийти на прием к участковому врачу, который даст направление на обследование в специализированное учреждение. С другой стороны, если вы заметили уплотнение в молочной железе, то можно сразу идти к маммологу.

— В 2018 г. Нобелевскую премию по физиологии медицины присудили за один из методов борьбы с раком. Когда онкологическое сообщество сможет окончательно сказать, что рак побежден?

— Я бы не ставил вопрос таким образом, поскольку каждый год происходят открытия, которые заметно улучшают результаты лечения онкологических больных. Например, можем ли мы сегодня с уверенностью сказать, что инфекционные заболевания побеждены полностью? Да, у нас есть антибиотики и понимание того, как такие заболевания лечить. Но даже настоящие события — пандемия коронавирусной инфекции — говорят о том, что человечество всегда будет сталкиваться с трудностями.

Могу сказать, что мы достигли несомненного прогресса в лечении онкологических заболеваний. Если удастся удержать его в прежнем темпе ближайшие несколько десятилетий, то, скорее всего, через 10–20 лет многие онкологические заболевания перестанут быть фатальными.

Между тем всегда важно помнить о точке отсчета. Когда я начинал работать, пациент с распространенным раком толстой кишки жил в среднем шесть месяцев. Сейчас такой пациент может прожить примерно три с половиной года. Если мы увеличим этот показатель хотя бы еще в два раза за следующие 20 лет, это будет большой прорыв. Некоторые типы онкологических заболеваний сегодня полностью вылечиваются — герминогенные опухоли, онкологические заболевания гематологического происхождения, лейкозы и др. Так что прогресс действительно колоссальный. ■

Беседовала Анастасия Пензина

ГЕОЛОГИЯ

ПУТЕШЕСТВИЕ В ДОКЕМБРИЙ

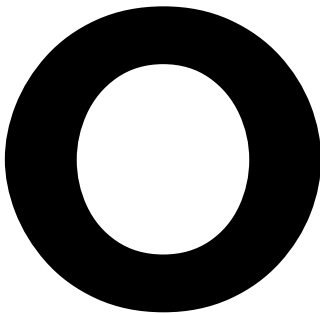
КАКИМ
БЫЛО
ДЕТСТВО
ЗЕМЛИ

?



Докембрий, или криптозой, — это геологический период в истории Земли от 540 млн до 4,5 млрд лет назад. Именно в это время на нашей планете появились земная кора, океаны, свободный кислород, первые живые организмы. Докембрий часто называют «детством Земли», ведь именно он стал трамплином, с которого некогда стартовала жизнь.

Одно из крупнейших месторождений железорудных карбонатов — сидеритов. Бакальская свита, ранний рифей, Петлинский карьер, г. Бакал, Южный Урал. Возраст вмещающих пород — 1,4 млрд лет, возраст оруденения — 1 млрд лет. Фото: М.Т. Крупенин, А.Б. Кузнецов, 2016 г.



Член-корреспондент РАН А.Б. Кузнецов

том, чем интересен докембрий и почему современная геологическая картина мира так схожа с периодом кембрийского взрыва, рассказал директор Института геологии и геохронологии докембрия РАН (Санкт-Петербург) член-корреспондент РАН **Антон Борисович Кузнецов**.

— Антон Борисович, чем уникален докембрий?

— Докембрий — самый продолжительный период геологической истории Земли, он длился около 4 млрд лет. Можно сказать, это была эпоха становления Земли, подготовка планеты к заселению открытой жизнью. Твердая геологическая оболочка появилась на поверхности Земли около 4,2 млрд лет назад. С тех пор земная кора начала свою эволюцию, которая продолжается по сей день.

Именно в докембрии появились крупные континенты, которые впоследствии разрастались, соединялись друг с другом, расплзались и сгущивались вновь. В раннем докембрии (архее) сформировался и океан. Вначале появились бактерии и прокариоты (безъядерные одноклеточные организмы), которые могли жить в сероводородной среде. Затем — эукариоты с оформленным клеточным ядром, которые со временем инкорпорировали в себя хлорофилл, что позволило им освоить процесс фотосинтеза и генерировать кислород. В результате этого на Земле произошла кислородная революция, появился свободный кислород, которым смогли дышать первые организмы, заселившие сначала океан, а потом и сушу.

С геологической точки зрения докембрий интересен тем, что в этот период сформировались самые крупные месторождения полезных ископаемых, в частности 80% всего добываемого

золота, огромные запасы железной руды. Все значительные залежи неметаллических полезных ископаемых, таких как магнезиты, сидериты хемогенного происхождения и т.д., образовались в докембрии. Появление кислорода стало одной из причин первого крупного оледенения 2,4 млрд лет назад, накануне экспансии строматолитов (цианобактериальных микроорганизмов) в мелководные моря всех континентов. Оледенения стали своеобразными маркерами, реперными точками, после которых происходил очередной скачок в эволюции жизни на Земле. Вторая крупная эпоха оледенений произошла уже в конце докембрия, накануне нового эволюционного витка — экспансии многоклеточных.

— На сколько геохронологических частей можно разделить докембрий?

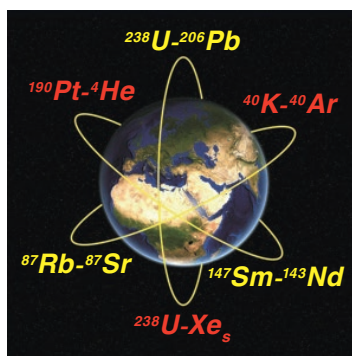
— В современной шкале он делится на несколько частей в миллиардах лет: гадей (до 4,0), архей (4,0–2,5), палеопротерозой (2,5–1,6), мезопротерозой (1,6–1,0) и неопротерозой (1,0–0,5). Одну из этих частей, так называемый гадей, ученые стали выделять совсем недавно. Это та загадочная эпоха, по следам которой мы не имеем вообще ни одной горной породы, не можем пощупать ее руками, как говорят геологи. Следы этого периода геологической жизни мы получаем только благодаря изучению ископаемых изотопно-геохимическими методами.

Первые породы, которые в докембрии мы уже можем потрогать, появились примерно в палеоархее (от 3,6 до 3,2 млрд лет назад). Наиболее древние из этих пород — гнейсы Исуа, их возраст примерно 3,7 млрд лет. Примечательно, что эти породы имели осадочное, водное происхождение. Что это значит? Оказывается, у Земли 3,7 млрд лет назад уже существовала водная оболочка. Об этом же нам говорят самые древние карбонаты в Южной Африке возрастом 3,4 млрд лет. Интересно и то, откуда на Земле появилась вода. Благодаря изотопным методам сегодня мы уже узнаем, что примерно 10% земной воды имеют не местное происхождение: эта вода прилетела к нам вместе с ледяными глыбами из космоса.

— А оставшиеся 90% откуда взялись?

— Остальные 90% — это, конечно, продукты дегазации магмы (процесс отделения газов от магм), горячего ядра нашей планеты. В реальности мы не можем увидеть магму, которая находится очень глубоко. Но о ее составе мы можем судить по каменным ксенолитам, выброшенным на поверхность кимберлитовыми трубками, а также по составу лавы современных и докембрийских вулканов. Так вот, количество минерально связанной и свободной воды в мантии достигает 0,2%. При этом архейские лавы коматиитов показывают, что количество воды в мантии 3,5–3,0 млрд лет назад было больше, до 0,6%. Много это или мало? Если учитывать современную вулканическую активность, это 200–300 млн т воды в год, около десяти Химкинских водохранилищ.

Магматическая оболочка нашей планеты прошла уникальную эволюцию, которую не прошла ни одна планета Солнечной системы. Взять хотя бы знаменитые граниты, которыми украшены набережные и метро нашего прекрасного города Санкт-Петербурга и станции метрополитена многих других городов России. Ведь таких пород нет ни на Марсе, ни на Венере, ни на других планетах Солнечной системы! Дело в том, что только благодаря горячему ядру и миллиардам лет конвекции магмы смогла состояться эволюция этого вещества от ультраосновного состава до кислого; то есть произошла выплавка земной коры, которая стала потом основой наших континентов. В ходе частичной переплавки уже выплавленного материала произошло обогащение коры калием и кварцем. Привычные для нас красивейшие друзы кварца также не встречаются ни на одной из соседних планет. С геологической



В докембрии на нашей планете появились земная кора, океаны, свободный кислород, возникли первые живые организмы

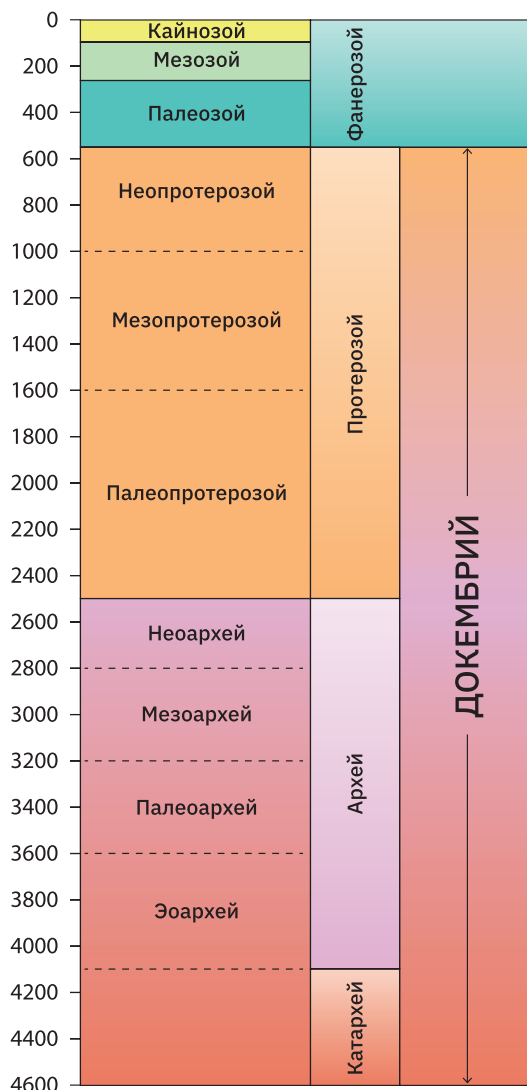
точки зрения Марс и Луна остановили свое развитие на границе архея и протерозоя.

— Расскажите, пожалуйста, подробнее о формировании континентов в докембрии.

— В истории Земли было несколько эпох суперконтинентального развития. В докембрии выделяют четыре крупные эпохи формирования континентов.

Образование континентов — очень интересный процесс, поскольку континенты на поверхности нашей планеты — словно живая ткань: фрагменты коры то сходились вместе, то расходились в разные стороны.

В докембрии было четыре больших суперконтинента, в это время отдельные крохотные острова собирались вместе. Суперконтинентальные эпохи совпадают с подразделениями докембрия. Самый масштабный и наиболее известный континент образовался на границе архея и протерозоя, то есть 2,5 млрд лет назад. Название этого суперконтинента — Кенорленд, или Склавия. После его распада



на границе палеопротерозоя и мезопротерозоя, около 1,7–1,6 млрд лет назад, в результате свекофенской орогении собрался суперконтинент Нуна (Колумбия). Кстати, именно в эту эпоху соединились в единую плиту Фенно-Карелия, Волго-Урاليا и Воронеж-Сарматия. Примерно 1 млрд лет назад в ходе глобальной гренвильской орогении образовался новый огромный суперконтинент Родиния. Он собрал все континентальные фрагменты, находящиеся на поверхности Земли. Само название — Родиния — было дано оттого, что этот огромный континент стал как бы прародителем всех остальных континентов, образовавшихся уже в фанерозое и палеозое (около 541 млн лет назад). В течение последующих нескольких сотен миллионов лет, накануне кембрийского взрыва, образовался новый суперконтинент Гондвана, или Паннотия.

— **Если бы у нас с вами была машина времени и мы бы перенеслись в самое начало докембрия, то какой пейзаж увидели?**

— Если бы удалось перенестись в гадей, мы бы увидели там бесконечные лавовые потоки и бурлящее море магмы вместо воды. В начале архея на Землю обрушился метеоритный дождь, который шел в течение нескольких миллионов лет, и суша стала выглядеть, как поверхность Луны. В позднем архее появился океан, который был похож на кипящие термальные источники с ядовитыми испарениями. С появлением кислорода и экспансией цианобактерий в протерозое моря превратились в мутный зеленый бульон, похожий на болота. Суша была похожа на современные пустыни, над которыми неслись пыльные бури. Ближе к концу докембрия, в криогении, Земля на несколько десятков миллионов лет покрылась многокилометровыми



Отсутствие пищевых конкурентов позволяло цианобактериям строить гигантские куполообразные постройки, похожие на современные рифы. На фото — древние строматолиты возрастом 2,5 млрд лет, формация Малмани, Южная Африка. Фото из архива А.Б. Кузнецова.



Появление свободного кислорода в океане на границе архея и протерозоя 2,5–2,4 млрд лет назад привело к осаждению растворенного железа и образованию гигантских залежей оксида железа. Железородная формация Пендж, Южная Африка. Фото из архива А.Б. Кузнецова.

ледниками, которые простирались от полюсов до тропических широт. Одним словом, ни травинки, ни деревца, ни пения птиц...

— **Последним этапом в хронологии докембрия был эдиакарий. Его часто сравнивают с библейским Эдемом. Почему?**

— Эдиакарий действительно называют эдаким райским садом. Дело в том, что в это время на Земле практически не было явных хищников, которые бы поедали живые организмы. В эдиакарии жили крупные многоклеточные мягкотелые организмы (похожие на лепешки), которые заселили все дно мелководных бассейнов и питались бактериальными матами (строматолитами). Эти бассейны, что интересно, были не совсем морскими, а находились в устьях крупных рек, то есть это некие осолоненные водные бассейны.

— **Те самые «мелкие, прогретые солнцем пруды», в которых, как говорил Дарвин, могла зародиться жизнь?**

— Жизнь, конечно, зародилась гораздо раньше эдиакария, но так называемые видимые многоклеточные организмы, вероятно, появились именно в этот период. Если мы говорим об эдиакарской фауне, то ее представители действительно предпочитали жить в мелких прудах, устьях. Почему именно там? Для таких организмов было важно, чтобы в зоне их обитания не было каких-то сильно приливно-отливных воздействий, чтобы их не уносило в океан, чтобы была спокойная гидродинамика. Эти древние животные ползали, как современные медузы, и собирали пищу со дна, однако существование их длилось недолго, поскольку вскоре, около 540 млн лет назад, появились новые организмы, которые их, попросту говоря, съели. Но это уже принципиально новая веха в истории Земли, которая называется кембрием.

— Как современная наука объясняет кембрийский взрыв, когда на Земле произошел невиданный резкий рост биоразнообразия? Это как-то связано с уровнем кислорода на планете в тот период?

— Безусловно, проблема кислорода играет здесь очень важную роль. Как раз после криогения, крупной ледниковой эпохи в конце докембрия (635–720 млн лет назад), в результате таяния ледников произошло необычное событие: океан полностью перемешался и исчезли его стратифицированные бескислородные оазисы, то есть океанские воды полностью насытились кислородом, вплоть до глубинных слоев. А ведь до этого, в докембрии, начиная от появления кислорода в морской воде примерно 2,5 млрд лет назад, он насыщал лишь поверхностный слой океана. Получается, что после неопротерозойских оледенений, накануне кембрийского взрыва, наш океан впервые насытился кислородом. Кроме того, ледниковые воды размыли большие площади суши, в результате чего океан обогатился огромным количеством питательных веществ — нутриентов, что также спровоцировало эволюционный скачок.

Во многих геологических разрезах, где присутствуют докембрийские породы, непосредственно перед появлением слоев с кембрийской жизнью, с кембрийской фауной мы наблюдаем слои, в которых явно присутствуют метки, указывающие на то, что количество кислорода в осадочных бассейнах увеличилось. Это демонстрирует очевидную связь уровня кислорода и кембрийского взрыва. Подобные геологические разрезы есть в разных местах земного шара: в Австралии, Африке, Северной Америке, Центральной Азии и на Восточно-Европейской платформе. В России такие разрезы мы находим в Архангельской области, Якутии и в других регионах.

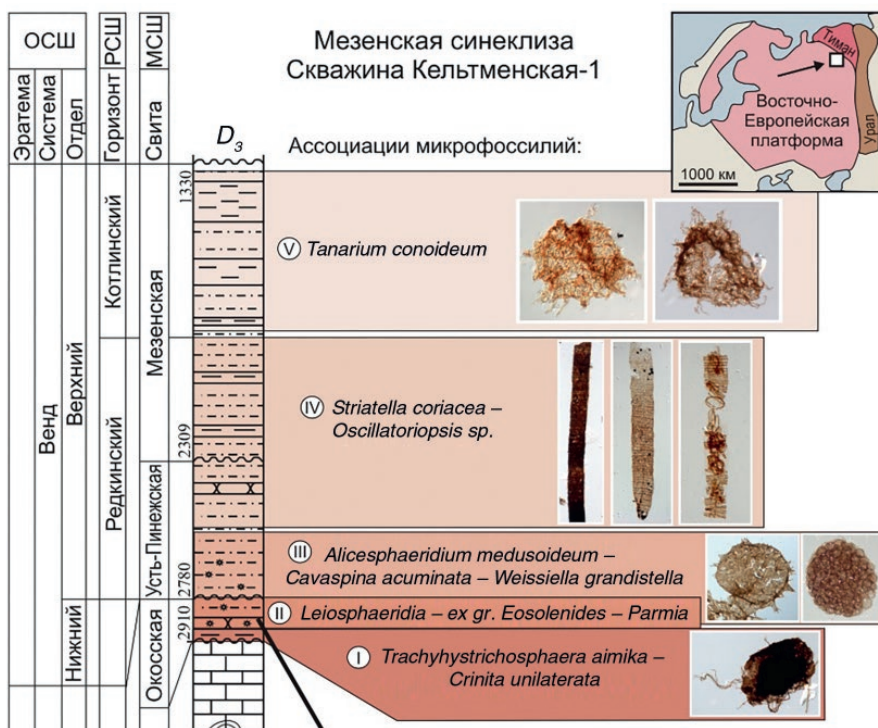
— В чем особенность кембрийского периода? Были у вас свои находки, связанные с кембрийским взрывом?

Микрофоссилии, населявшие древние моря 640–540 млн лет назад накануне кембрийского взрыва. Коллекция Е.Ю. Голубковой, ИГГД РАН. Рисунок с дополнениями из статьи в «Докладах академии наук» (2015, т. 462, № 4, с. 444–448).

— Моя первая встреча с кембрийским взрывом произошла в Монголии, в сухом русле древней реки Баян-Гол. Иду вдоль стенки докембрийских однообразных глинистых пород и вдруг вижу зигзагообразный отпечаток следа ползания древнего организма, похожего на след дождевого червя. Еще несколько метров вперед — и вот уже вся поверхность древнего водоема кишит следами «червей». При этом количество таких следов невероятно большое, черви ползали друг по другу. В этой точке проходит граница между кембрием и докембрием, и в нее можно буквально ткнуть пальцем.

Чуть позднее в кембрии появились сразу несколько невиданных ранее животных: мелкораковинные моллюски, археоциаты, трилобиты, хиолиты. Это был великий эксперимент природы.

Я сейчас работаю с палеонтологами из Улан-Удэ, которые изучают археоциаты — организмы, похожие на современные губки, появившиеся как раз в кембрийском взрыве. Это очень интересные организмы, которые жили на незакрепленном, мягком осадке. Особенно интересно, как они перемещались, потому что центром появления, зарождения археоциат считается Сибирская платформа, а именно Якутия. Так вот, в кембрии мы находим следы археоциат и на других континентах, в том числе в Америке, Австралии, Азии. Таким образом, у нас возникла интересная гипотеза: рядом с древним Сибирским континентом существовала цепь островных поднятий. Это своеобразные архипелаги, молодые островные дуги по типу Гавайских островов или Курильской гряды. И эта гряда соединялась с другими континентами. В это же



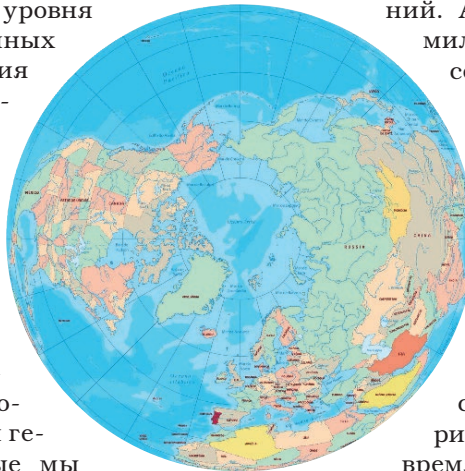


Отпечатки следов ползания древних организмов. Слева: вероятно, *Helminthoidea*. Справа: *Helminthoidea*, *Palaeophycus* и *Phycodes pedum*. Баянгольская свита, Монголия. Фото: А.Б. Кузнецов, 2013 г.

время на Сибирской платформе, примерно в месте появления этой гряды, было устье крупной реки, и все водные потоки, которые следовали из центра Сибирского континента, проходили вдоль этой островной дуги и таким образом переносили все зародыши этих археоциат на другие континенты. К сожалению, археоциаты самостоятельно не перемещались, а пищу добывали путем фильтрации воды, поэтому изменение уровня океана и быстрый подъем глубинных холодных вод в середине кембрия привели к исчезновению экологической ниши и их вымиранию. Они не успели распространиться на все континенты.

— Правда ли, что нынешний геологический этап в развитии Земли очень напоминает геологию кембрийского периода?

— На границе кембрия и докембрия произошел ряд крупных геологических, климатических и геохимических событий, которые мы наблюдаем и в наши дни, то есть в конце кайнозоя, четвертичного периода. В частности, на границе кембрия образовался крупный суперконтинент. Вы скажете: «Но ведь сейчас нет никакого суперконтинента, поскольку наши континенты разъединены», однако это неправильное мнение, поскольку вы смотрите на нашу планету на обычной географической карте, там, где проекция идет с экватора. Но если вы возьмете глобус и посмотрите на нашу Землю с Северного полюса, то увидите, что вся Евразия соединяется с Северной Америкой, а между ними находится маленький Северный Ледовитый океан. По геологическим масштабам — разве это океан? Его объем составляет всего 4% от современного Мирового океана.



— То есть мы видим, по сути, один континент?

— Фактически да, сейчас мы наблюдаем один суперконтинент, который имеет звездчатую форму — это точная аналогия континента Паннотия-Гондвана, который существовал 540 млн лет назад, как раз во время кембрийского периода.

Кроме того, мы знаем, что в конце докембрия на планете был период массовых оледенений. А что же сейчас? За последний миллион лет у нас тоже произошла серия оледенений. Что еще? Сейчас я занимаюсь изучением изотопного состава стронция (химический элемент с атомным номером 38) и могу сказать, что кривая вариаций изотопного состава стронция в точности повторяет тренд, который существовал на границе кембрия и докембрия. Мы видим изотопный максимум стронциевой кривой в этом периоде. Примечательно, что в наше время мы тоже видим такой максимум. Кроме того, он совпадает с появлением суперконтинента, с завершением стадии оледенений и формированием крупных фосфоритовых залежей. Фосфоритовые залежи — это показатель изменения геохимии океана, то есть это подъем глубинных океанических вод и резкого обогащения океана нутриентами питательными веществами. О чем это может говорить? Что у нас произошло на границе кембрия и докембрия? Мощный эволюционный толчок, кембрийский взрыв, появилась новая жизнь. Получается, 540 млн лет назад произошел эволюционный скачок, а значит, и сейчас мы можем стоять накануне нового эволюционного скачка. И что будет дальше, неизвестно. Тот факт, что сейчас происходит изменение биоразнообразия, думаю, очевиден. Каждый

год на планете сокращается количество видов животных. Это, конечно, связано с различными экологическими проблемами. Резюмируя: кембрийский взрыв за полмиллиарда лет привел к появлению человека, а к чему приведет нынешний взрыв и будет ли там место для нас как биологического вида, мы еще не знаем.

— **Как на этот процесс влияет глобальное потепление?**

— Чередование эпох похолодания и потепления — это обычная геологическая климатическая история планеты, как ее дыхание: Земля вдыхает и выдыхает. В генеральном смысле, конечно, мы движемся сейчас, наверное, к потеплению в геологическом масштабе. Но что касается локальных столетних циклов, то может быть и похолодание. Это вопрос, конечно, к климатологам.

Я думаю, что в геологическом плане наша Земля входит в стадию кембрийского взрыва именно в связи с геологическим потеплением. В дальнейшем будут таять ледники, будет увеличиваться объем океана, соответственно, все низменности и города, которые расположены на побережье, будут затоплены. Это и есть аналог кембрийской ситуации, когда у нас были затоплены все низины тех древних континентов. И именно в низинах сформировалась та кембрийская жизнь, которая потом заселила Землю.

— **Геологическая активность представляет собой неперемнное условие возникновения жизни?**

— Да, я считаю, что геологическая активность, геологическая эволюция — это предшественник биологической эволюции. Только на нашей планете сформировались те условия, которые позволили так развиться жизни. Ни на какой другой планете нет подобных геологических предпосылок для появления жизни.

— **А как же спутник Юпитера Ио — самое вулканически активное тело в Солнечной системе? Из этой вулканической активности может впоследствии родиться жизнь?**

— Теоретически это не исключено. Но нужно изучить глубинное строение Ио, узнать, насколько там дифференцировано магматическое вещество. Активный вулканизм мы наблюдаем на Венере с ее кислотной атмосферой, кстати, близкой по составу к раннему архею Земли 3,5 млрд лет назад. Надо понять, какое количество воды, пригодной для жизни, там есть и есть ли вообще. В идеале температура воды должна соответствовать температурам нашего океана. Только в этих условиях будет возможно формирование зачатков жизни. Кроме того, должны сформироваться стабильные участки земной коры, наподобие наших

континентов. Сам по себе активный магматизм — конечно, не гарант развития жизни.

— **Какие регионы нашей страны представляют максимальный геологический интерес?**

— Я думаю, геологи имеют свой интерес там, где обнажены те или иные горные породы. Мы, например, занимаемся докембрием, и у нас докембрий представлен в основном в северных регионах страны: в Карелии, на Кольском полуострове, в Сибири, на Урале. Большая часть докембрия вскрыта в Восточной Сибири, в Саянах и далее в Азии, в частности в Монголии. Будучи в экспедиционных работах в Сибири, поедаемый комарами и мошкой, я часто думал: ну почему же я не занимаюсь мезозоем? Тогда бы сейчас работал в Средиземноморье, на прекрасных берегах Италии и Греции. (Смеется.)

— **Ваш Институт геологии и геохронологии докембрия целиком посвящен изучению докембрия. Неужели это настолько специфический период, что для его исследования потребовались отдельный научный подход и отдельный институт?**

— Да, так и есть. Все исходит из специфики изучения горных пород этого времени. Их долгое время называли «немыми толщами», потому что в них не было никаких органических остатков, а большинство пород метаморфизовано — изменено вторичными процессами. И только с возникновением новых изотопных и геохимических методов появилась возможность изучать эти породы.

Наш институт был создан в Ленинграде через пять лет после тяжелейшей войны, блокады. Его основатель, А.А. Полканов, даже в блокаду вел



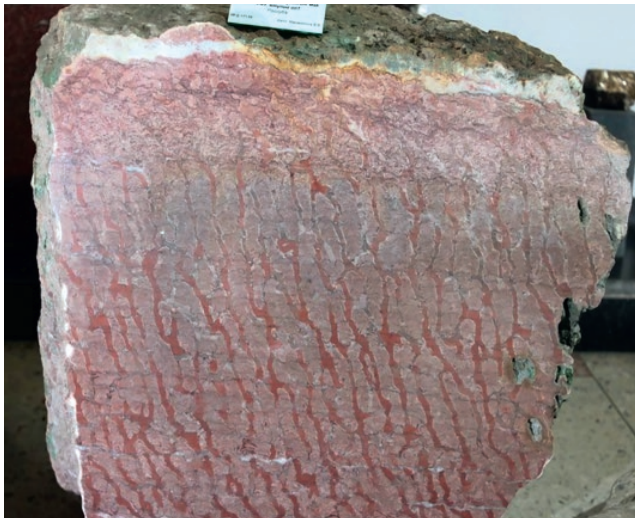
Один из ярких представителей эдиакарской фауны — дикинсония (*Dickinsonia*). Отпечаток обнаружен в глинах редкинского горизонта на берегу Белого моря, Архангельская область. Фото: Е.Ю. Голубкова, ИГГД РАН, 2015 г.

переписку с академиком В.И. Вернадским о необходимости радиохимических исследований для целей геологии. В итоге именно здесь была впервые открыта лаборатория радиохимии и произошло уникальное историческое событие: синтез геологии и радиохимии. Это дало синергетический эффект изучению древних немых толщ. Тогда был создан технический задел и сложилась научная школа, что позволило нам занять лидерские позиции в изучении докембрия.

ИГГД РАН — колыбель геохронологии в Советском Союзе. На сегодня из 16 методов изотопного определения возраста горных пород, существующих в мире, четыре было разработано у нас. И этим можно гордиться. Из этих стен началось распространение геохронологической школы в институты Урала, Сибири, Дальнего Востока

— А какие задачи стоят перед институтом сегодня?

— Наиболее важной задачей я бы назвал усовершенствование приборной базы. Я постоянно обращаюсь в Минобрнауки с просьбой о создании у нас комплекса по изучению вещества природного, техногенного и антропогенного происхождения. Нашей стране нужен хотя бы один изотопно-геохронологический центр, оснащенный по меркам средневропейского института. Без этого невозможно определить возраст горных пород, что составляет основу любой геологической карты. Без этого мы не можем понять происхождение древних осадков и условий эволюции, построить модель образования месторождений полезных ископаемых и дать прогноз на их поиск.



В ископаемом виде строматолиты дошли до нас в виде каменных куполообразных построек. Древний строматолит *Parallelophyton raigibicum* — свидетель углеродной аномалии в ломагунди-ятулийскую эпоху. Ранний протерозой, ятулий, 2,1 млрд лет, оз. Сундозеро, Карелия. Коллекция В.В. Макарихина. Музей геологии докембрия ИГ КарНЦ РАН. Фото: М.Ю. Плаксин.

Для этого нужно не так много средств, но необходимая линейка масс-спектрометров у нас в России, к сожалению, не производится и может быть закуплена только за рубежом. В нашей стране вся научная школа по приборостроению масс-спектрометров фактически умерла после распада СССР. Кстати, с распадом СССР мир отказался от шкалы, которая была разработана для докембрия в нашей стране.

Вы правильно сказали, что для изучения докембрия нужен отдельный научный подход, отдельные научные программы. Нельзя, как говорится, стричь всех под одну гребенку. Все необходимые методики у нас разработаны, но обновления приборной базы в институте не происходило в течение 20 лет после распада Советского Союза. В рамках Программы развития института на период 2019–2024 гг. нам была зарезервирована сумма, на порядок меньшая, чем требуется для качественного обновления и рывка. В таких условиях совершать какие-либо открытия и конкурировать с зарубежными коллегами просто невозможно. Мы строим шкалу геологического времени, нам нужна линейка приборов, а этой линейки у нас нет. Получается замкнутый круг.

— Напоследок хотела поговорить о геохимии океана. Насколько хорошо изучены процессы, происходящие в наших водах? Ведь не зря существует расхожая фраза о том, что ближний космос нами изучен лучше, чем Мировой океан.

— Безусловно, геохимия океана — это ключ к пониманию природных процессов, которые происходили в докембрии. Поскольку по докембрию у нас нет никаких ископаемых остатков, понять экологическую, палеоэкологическую и палеоклиматическую историю нашей планеты в этот период мы можем только с помощью изучения осадочных горных пород, которые отлагались в морских бассейнах.

Что мы узнали, изучая осадочные породы? Мы узнали, когда на планете Земля появился кислород (около 2,5 млрд лет назад), какие континенты сближались и удалялись, какой был с них речной сток. Возьмем, например, нашу Восточно-Европейскую платформу. Практически 90% всех осадков поступало из Скандинавии, и все они переносились крупными палеореками на другой конец континента, в район современного Каспия и Южного Урала.

Мы узнали, что первые сульфаты и гипс появились 2 млрд лет назад. Кстати, древнейшие гипсы недавно обнаружены при бурении скважины на глубине около 3 км на полуострове в Онежском озере Карелии. Мы можем по изотопным аномалиям оценить температуру океана, которая в архее достигала 40° С.

С помощью изотопно-геохимического изучения морских осадков мы узнаем также о палеосолёности в древности. Все крупные биостратиграфические находки (например, наиболее известные

ископаемые формы — строматолиты, с которыми часто путают современные рифы) тоже жили в океане. Но это всего лишь продукты жизнедеятельности цианобактериальных матов — отдельных бактериальных организмов, которые обитали на поверхности осадков и строили причудливые фигуры и формы, похожие на водоросли, на древние кораллы. Кроме того, морские осадки сохраняют в себе микроорганизмы, по которым наши палеонтологи выстраивают биологическую эволюцию, происшедшую в докембрии. В основном это одноклеточная жизнь. Сами микроорганизмы в морских осадках появились примерно 3,5 млрд лет назад, в архее. Они жили только в небольших оазисах, вблизи теплых термальных источников, и лишь потом распространились в крупные морские бассейны. Следующей новацией было появление фотосинтезирующих цианобактерий, которые господствовали в протерозое на протяжении 2 млрд лет. В результате их жизнедеятельности произошла первая экологическая катастрофа между 2,2 и 2,0 млрд лет назад. Массовое вымирание микроорганизмов зафиксировано по аномально высоким значениям изотопного состава углерода в карбонатных осадках на всех континентах. Это период называется «ломагунди-ятулийская эпоха». Последующее захоронение микроорганизмов привело к образованию углеродистых сланцев, аналогов нефтеносных толщ — это знаменитые шунгиты Карелии.

Что еще можно сказать? Исходя из изучения морских осадков, мы, например, узнали, что в докембрии был период, когда не происходило ничего, так называемый «скучный миллиард» (*boring billion*), который длился примерно между 2 млрд и 1 млрд лет назад. В тот период на поверхности Земли не случилось никаких эволюционных новаций. Была такая застывшая жизнь. Все это я связываю с тем, что на поверхности нашей планеты произошла некая стабилизация, но при этом ученые, исследующие магматический комплекс докембрия, наоборот, фиксируют крупные изменения именно в глубинных слоях Земли. Это означает, что на поверхности было затишье, а в глубине происходили дифференциация вещества, образование новых комплексов, новых глубинных месторождений полезных ископаемых. Вверху же, тем не менее, все микроорганизмы жили себе спокойно и ничего не знали о том, что под ними кипит очаг, настоящий котел.

Изучение геохимии океана дает нам самые разнообразные знания о прошлом нашей Земли. Ведь именно в океане формируется летопись того, что происходило на поверхности планеты. Именно в воде появились жизнь и живые организмы. В действительности мы изучаем лишь следы исчезнувшей воды. При этом каждый химический элемент имеет индивидуальные особенности — от момента разрушения горных пород до стадии



1. Ожелезненный строматолит *Conophyton*, концентратор растворенного железа. Ранний рифей, бакальская свита, 1,4 млрд лет, Иркутский карьер, г. Бакал, Южный Урал. Фото: М.Т. Крупенин, 2016 г.
2. Строматолит *Linnella Ukka*, живший накануне последнего докембрийского оледенения 720–800 млн лет назад. Поздний рифей, укская свита, г. Усть-Катав, Южный Урал. Фото: А.Б. Кузнецов, 2019 г.

осаждения и взаимодействия с микроорганизмами. Знание этих закономерностей позволяет нам реконструировать экзогенные процессы прошлого.

Самая главная проблема докембрия — фрагментарность геологической летописи и высокая степень преобразования пород. Это радикально ограничивает нас в изучении прошлого. Кстати, после образования суперконтинента Родиния исчезли все мелководные моря и мы не имеем никаких осадочных записей для периода продолжительностью около 100 млн лет.

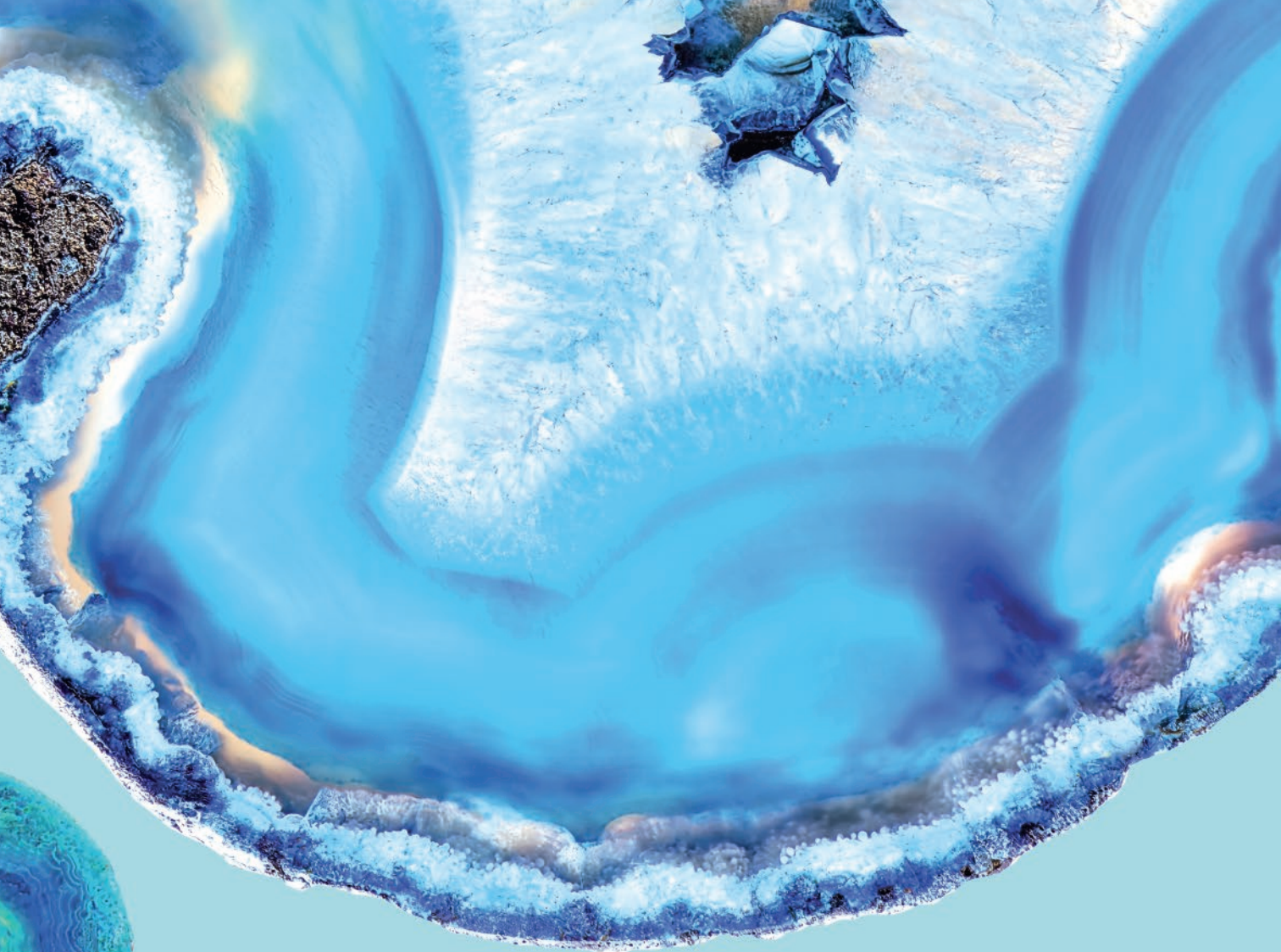
Многое сделано нашими учителями, но до сих пор среди ученых нет единства относительно целого ряда ключевых проблем докембрия. Белых пятен еще немало, и их заполнение — в наших руках. ■

Беседовала Янина Хужина

МИНЕРАЛОГИЯ

ВЕСТИ *из царства* МИНЕРАЛОВ





Ученые не перестают искать и исследовать новые минералы. Они находят применение в химической промышленности, оптике, электронике, радиотехнике. И это далеко не полный список. Главный научный сотрудник геологического факультета МГУ член-корреспондент РАН **Игорь Викторович Пеков** пригласил нас в Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН и рассказал о корнях науки минералогии и о том, чем она занимается сегодня.



Член-корреспондент РАН И.В. Пеков

— Что сегодня изучает минералогия?

— Годы у нее почтенные, должен заметить. Пожалуй, это самая древняя из наук о Земле и, возможно, вообще самая древняя из наук. Человеку руда понадобилась несколько тысяч лет назад, а кремний — еще раньше. С самого зарождения цивилизации люди нуждались в знаниях, где и как искать тот или иной минерал и что с ним делать. И, собственно, слово *minera* — это «руда» по-латыни. Отсюда и слова «минерал», «минералогия». То есть изначально минералогия была наукой о рудах.

Минералогия сегодня — это уже нечто другое. Считается, что минералогия в современном понимании оформилась на рубеже XVIII–XIX вв., стоя на трех китах. Первый кит — это сложившаяся в тот же период концепция геологии, которая объясняла, как рождаются минералы и их ассоциации, что они собой представляют в генетическом, как мы сейчас говорим, отношении. Второй кит — аналитическая химия, да и вся неорганическая химия, которая бурно развивалась в XVIII в. Тогда ученые уже четко понимали, что такое минерал с точки зрения его химического состава. И третий кит — это морфологическая кристаллография, которая, по сути, ввела минералогия в разряд точных наук. Ученые того периода стали уже не просто измерять кристаллы, а изучать закономерности, влияющие на их форму, и связывать эти данные с химическими характеристиками минералов.

Отмечу, что не только минералогия обязана химии и кристаллографии, но и эти науки обязаны своим становлением минералогии, поскольку почти все объекты, которые изучались в тот период химиками-неорганиками и кристаллографами, происходили из мира минералов.

Таким образом это направление оформилось в самостоятельную научную дисциплину и само понятие «минерал» получило то наполнение, с которым мы сегодня работаем.

Минерал — это природное кристаллическое тело, имеющее устойчивый (в определенных границах) химический состав. Уже первые специалисты-минералоги предполагали, что минералы обладают некой правильностью в своем строении, превосхитив представления о том, что мы сегодня называем кристаллической структурой. И в начале XX в. эти предположения были блестяще подтверждены.

Кристаллическая структура минерала характеризуется определенным порядком расположения атомов тех элементов, из которых он состоит. На протяжении не толь-

ко XX в., но последних 200 лет кристаллическая структура (пусть поначалу только предполагавшаяся) остается одним из главных, базовых понятий минералогии.

Современная минералогия связывает, по сути, несколько научных направлений: науки о твердом кристаллическом веществе, то есть физику и химию твердого тела, кристаллографию, кристаллохимию, с науками о Земле — геологическими дисциплинами, особенно с теми, которые исследуют непосредственно вещество Земли, — петрологией и геохимией, а также с учением о полезных ископаемых. Здесь уже четко прослеживается практический аспект. Так вот, посередине этой связки стоит минерал, который можно и нужно изучать, используя как методологию наук о веществе, так и подходы наук о Земле.

В первую очередь минералогов интересует, где и как минералы образуются, из чего они состоят и как устроены. Получив информацию об этом, мы уже можем переходить к практическим приложениям. Не секрет, что подавляющее большинство руд состоят из минералов, включая как полезные, так иногда и вредные. Практически все горные породы полностью или по большей части сформированы из минералов. Проще говоря, вся неживая природа, которая нас окружает, более чем на 95% состоит из кристаллического вещества, именуемого минералами.

— Как природа создает эти минералы?

— Этот вопрос — один из главных в современной геологии. Поиск ответов на него занимается раздел нашей науки, именуемый генетической минералогией. Происхождение минералов зависит от самых разных факторов. Уточним, что речь идет о твердых кристаллических телах.

Пожалуй, в современной минералогической классификации «нетвердых» минералов осталось всего несколько: самородная ртуть и еще некоторые жидкости на ее основе (раньше к минералам иногда относили нефть, воду, природные рассолы). Поэтому одно из первых ограничений — температурное. Понятно, что кристаллизация минералов из расплава может происходить только при температурах ниже температуры их плавления. Диапазон кристаллизации минералов из расплавов велик — от самых горячих магматических пород (выше 1000° С) до комнатной температуры (например, образование льда при замерзании воды — тоже кристаллизация из расплава). Гидротермальное минералообразование — кристаллизация из водных растворов — возможно в интервале температур, в котором может существовать жидкая вода, приблизительно до 370° С.

В целом выделяют три главных фактора, влияющих на образование кристаллов, — температуру, давление и химический состав природной системы, в которой происходит кристаллизация. Сочетание этих факторов (то есть физико-химические условия минералообразования) определяет то, что получится в итоге, какие минералы вырастут, какие устойчивые сообщества минералов (их называют минеральными ассоциациями) образуются. Например, здесь, в одной из витрин Минералогического музея, мы видим вместе малахит и азурит. Это основные карбонаты меди с разным соотношением компонентов, но со схожим валовым составом. Они образуются вместе, создавая тесную минеральную ассоциацию. Если минералы кристаллизуются одновременно и вместе, то их ассоциация называется «парагенезис»; изучение парагенезисов дает очень важную информацию для понимания того, в каких условиях кристаллизовались минералы.

Вообще, на сегодня известно около 6 тыс. минералов. Много это или мало?

— Кажется, что много.

— А мне кажется, что мало. Почему? Потому что есть с чем сравнивать. Например, разнообразие животных оценивается в 1,5–2 млн видов. Разнообразие химических соединений, синтезированных человеком, приближается к 10 млн. Отчасти поэтому вопрос о поиске новых минералов очень актуален.

Прирост минерального царства сегодня — около сотни новых видов в год, тогда как прирост числа искусственных соединений, согласно данным, опубликованным в химических журналах, происходит со скоростью около 200 в день.

Замечу, что из 6 тыс. минералов более половины еще не синтезированы человеком. Это к вопросу о том, как природа создает уникальные объекты, которые мы не можем воспроизвести. Конечно, есть целый ряд минералов, которые просто никто не пытался воспроизвести, в этом не было нужды. Были и те, которые пытались синтезировать целенаправленно, но безуспешно. Например, эвдиалит — цирконосиликат сложного состава, красивый минерал, который природа создает миллиардами тонн в щелочных породах. Попыток было много, но все неудачные. Поэтому тягаться с природой на равных мы пока не в состоянии.

— Что мы упускаем?

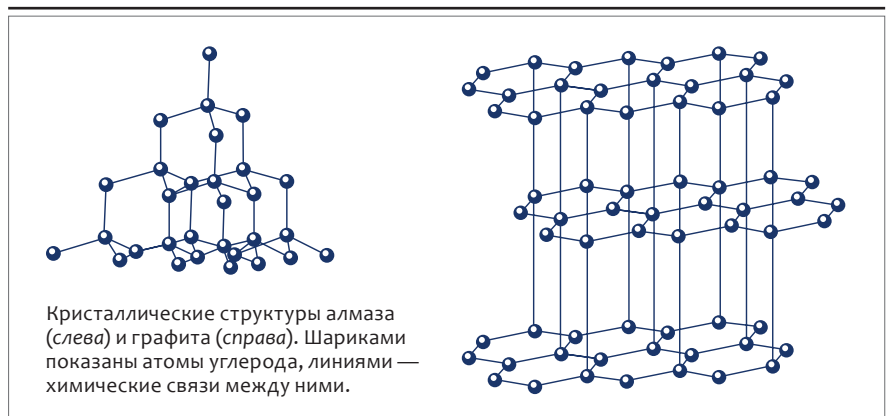
— Хороший вопрос, но он пока без ответа. В случае с эвдиалитом вроде бы и компоненты те же, и условия понятные. Но в искусственных условиях не растет. И таких загадок огромное количество.

— Зато многие свойства минералов уже известны. Какие из них ключевые?

— Под словом «свойства» можно понимать разные вещи. В базовом курсе минералогии мы прочтем, что любое кристаллическое тело обладает целым набором физических свойств, и некоторые из них мы можем наблюдать без специальных приборов: цвет, прозрачность, плотность, твердость и спайность, то есть способность раскалываться по определенным направлениям. В свое время именно спайность и натолкнула исследователей на мысль, что кристаллы состоят из правильных, но очень маленьких частиц.

Друза кварца, например, имеет серый цвет, стеклянный блеск и состоит из прозрачных кристаллов. Если мы попробуем прикусить кусочек кварца, то заметим, что твердость нашего зуба, в общем-то, поменьше, чем у этого минерала. Попробуем друзу поднять — будет ясно, что она тяжелая: выходим на понятие плотности. Все эти характеристики объединяются в один набор свойств, которые используются как диагностические — для определения минералов по внешним признакам.

Однако есть и другие — так называемые полезные свойства. Уже названные физические



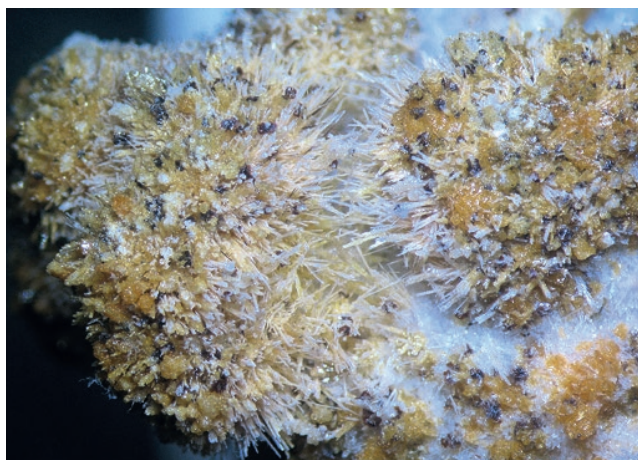
свойства, конечно, важны: та же твердость минерала позволяет использовать его в качестве абразива, а прозрачность в свое время обусловила использование слюды в производстве окон. Но все же в современных высокотехнологичных областях внимание специалистов направлено на более сложные особенности.

Скажем, некоторые минералы обладают магнитными свойствами, другие используются в качестве полупроводников. Оптические свойства важны, например, в сфере лазерных технологий. Кстати, многие минералы не используются сами по себе. Благодаря изученным свойствам и другим характеристикам минерала специалисты создают аналог, зачастую даже улучшенный, и используют его в тех или иных областях техники: так минералы становятся прототипами новых полезных материалов.

Особую роль играют также пьезоэлектрические свойства. В советское время существовала целая отрасль промышленности, которая занималась созданием пьезоматериалов, в первую очередь синтетического кварца. Пьезоэлектрический эффект тесно связан с кристаллической структурой минерала. Практически все свойства, которыми способны обладать кристаллические вещества, известны у тех или иных минералов.

— Где и как исследователи ищут новые минералы?

— Если говорить о нас, то специально мы этого не делаем. Мы изучаем некие минералогические объекты и решаем разные задачи. Главная фундаментальная задача — получить новые знания о самих минералах и их происхождении. Ясно, что так или иначе мы сталкиваемся с некоторым разнообразием минералов, и время от времени попадаются те, которые пока науке известны не были. При этом есть такие природные объекты, где вероятность найти новый минерал существенно больше, чем в других. Скажем, если мы будем изучать территорию Московской области, то вероятность этого крайне невелика, поскольку



местные осадочные горные породы не отличаются большим минеральным разнообразием и хорошо изучены, так что, наверное, почти все, что можно было найти, уже найдено. Однако есть территории, где в силу природных условий минералов объективно много и они очень разнообразны. Соответственно, в этих местах чаще попадаются пусть и уже известные, но малоизученные или, если повезет, неизвестные науке минералы.

Как правило, это объекты с аномальными с точки зрения геохимии условиями, где наблюдается необычное для природы сочетание химических элементов. Именно здесь и происходит концентрирование редких элементов. В природе, как известно, есть распространенные химические элементы, из которых состоят большинство горных пород, типичные минералы и руды. Пожалуй, из тех почти 6 тыс. минералов, о которых мы говорили, таких типичных, широко распространенных не наберется и 500. Все остальные минералы относятся к редким или даже очень редким, и многие из них содержат редкие химические элементы — например, элементы платиновой группы, редкоземельные металлы, цирконий, ниобий, тантал и др.

Существуют объекты, где сами условия минералообразования необычны. Одна из витрин музея как раз посвящена минералам вулканическим и в значительной мере иллюстрирует минеральное разнообразие, которое возникает в результате деятельности вулканических fumarol. Горячий вулканический газ, богатый растворенными в нем редкими элементами, выходит на поверхность и быстро остывает, образуя многочисленные минералы. Этот процесс называется десублимацией. В таких местах достаточно велика вероятность того, что будет обнаружено что-то необычное. Почему? Потому что в результате вулканической активности формируется необычное сочетание условий: здесь очень высокая температура газа — 700–800° C, а давление при этом атмосферное.

— Почему эти условия можно считать необычными?

— Большинство высокотемпературных минеральных ассоциаций в природе возникают при больших давлениях на глубине, поэтому высокая температура плюс низкое давление и газовый транспорт вещества — это необычная ситуация

Недавно открытый в одной из активных fumarol вулкана Толбачик на Камчатке новый минерал рабдоборит-(W) имеет очень необычный химический состав — $Mg_{12}W^{6+}_{13}O_6(BO_3)_6F_2$ — и оригинальную кристаллическую структуру. На этой фотографии показаны многочисленные бежевые игольчатые кристаллы рабдоборита-(W), которые вместе с темно-коричневым магнезиоферритом $MgFe^{3+}_2O_4$ нарастают на желтый и оранжевый арсенатный гранат берцелиум $(Ca_2Na)Mg_2(AsO_4)_3$ и голубовато-белый ангидрит $CaSO_4$. Фото: А.В. Касаткин, И.В. Пеков.



Витрина в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, посвященная минералам, образовавшимся в результате вулканической деятельности

для природы. И специалисты сразу понимают, что найдут здесь интересные минералы и новые минеральные ассоциации. Исследуя зоны вулканической активности, мы имеем высокую вероятность того, что попадется что-то неизвестное.

— Как специалисты понимают, что перед ними нечто новое?

— Чтобы понимать, что перед нами что-то новое, необходимо знать, что есть старое. Минерал считается новым, когда он не может быть отождествлен ни с одним из уже известных. Ясно, что в поле, когда отбираются пробы, нет в этом уверенности, есть лишь предположение. Четкое понимание приходит уже после изучения минерала лабораторными методами, когда определяются его важнейшие характеристики: химический состав, принадлежность к тому или иному структурному типу. В целом определение минерала, минерального вида базируется на трех признаках. Первый — природное происхождение. Далее важны две ключевые характеристики, которые определяют минеральный вид: то, какими атомами сложен кристалл, и то, в каком порядке в этом кристалле выстроены атомы. То есть химический состав и структурный тип.

Например, химический состав может быть один и тот же, а структурные типы — разные, тогда и минералы будут отличаться друг от друга, иногда очень сильно. Хрестоматийный пример — графит и алмаз. Одни и те же атомы углерода, которые по-разному расположены, образуют разные системы химических связей, и это определяет в конечном итоге свойства, такие разные у этих двух минералов.

Определяя ключевые характеристики, мы понимаем, имеем ли дело с уже известным минералом, с некоей его разновидностью или с чем-то ранее неизвестным, с новым сочетанием химического состава и структуры. Но об открытии на этом этапе говорить рано. Чтобы открытие состоялось, нужно

детально изучить найденный минерал, определить его структуру, химический состав, свойства, составить, образно говоря, портрет минерала и представить его минералогическому сообществу — специально созданной Комиссии по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной минералогической ассоциации, которая рассматривает каждую такую заявку в обязательном порядке. Квалифицированные специалисты оценивают, во-первых, фактор новизны, во-вторых, степень изученности. Только после того как «кандидат» проходит апробацию комиссии, в которую входят представители более чем 20 стран, национальных минералогических обществ, включая российское, найденный объект приобретает статус нового минерального вида. Утверждается и его название. После этого он становится полноправным членом царства минералов. В нынешнее время, как я уже говорил, за год успешно проходит такую процедуру около сотни минералов.

— Какова современная приборная база ученого-минералога?

— Все зависит от целей, которые перед ним поставлены. Важнейшая общая задача, которая традиционно решалась и решается в практической минералогии, связана с идентификацией минералов. Часто бывает так, что специалисты из других областей, по большей части геологи, которые занимаются горными породами или рудами, обращаются к минералам с вопросом: что же мы нашли? Или: что мы получили в лаборатории? Требуется идентификация разной степени детальности, зависящей от поставленной задачи.

Не утратили и, видимо, никогда не утратят своего значения традиционные методы. В первую очередь, это оптическая микроскопия. Чтобы идентифицировать и дальше изучать минерал, надо его увидеть. Не все минералы образуют крупные выделения. Некоторые из них могут иметь размер на уровне десятых, сотых и даже тысячных долей миллиметра, поэтому без оптической микроскопии не обойтись. Оптическая микроскопия позволяет исследовать полированные срезы, изучать прозрачные минералы в проходящем поляризованном свете и многое другое.

В последние годы растут возможности электронной микроскопии. Метод похож на оптический, только в данном случае при формировании изображения вместо светового потока используется пучок электронов.

Для определения химического состава минералов применяется электронно-зондовый микроанализ, он же микрорентгеноспектральный. Этот локальный метод хорошо сочетается с электронной микроскопией. Как правило, используемый нами электронный микроскоп имеет специальные приспособления для определения количественного химического состава.

Для изучения структурных особенностей минералов используются дифракционные методы. Поскольку атомы, ионы и любые другие строительные частицы кристалла образуют правильные системы, на них возможна дифракция лучей, длина волны которых сопоставима с межатомными расстояниями, а это в первую очередь рентгеновские лучи. Помимо этого может использоваться дифракция электронов или нейтронов. Синхротронное излучение в последнее время очень в почете, в том числе и потому, что можно менять длину волны и при этом получать большую мощность пучка.

Однако электронно-зондовые методы плохо работают, когда в составе минерала есть легкие элементы, или вообще не работают в случае с водородом, у которого нет рентгеновской линии. В таком случае используются ионное микрозондирование и другие методы.

Для определения свойств минерала и уточнения строения кристаллов применяются спектроскопические методы. Так, инфракрасная спектроскопия — очень мощный инструмент для изучения межатомных взаимодействий в кристалле: как устроены соседние пары атомов или целые группы атомов, какие химические связи существуют между ними, какова общая геометрия связей. Этот же метод позволяет работать с так называемыми рентгеноаморфными веществами, которые не дают дифракционных картин.

Методов много, и они используются при решении разных задач. Практически любой метод, практикуемый в физике твердого тела и в неорганической химии, может быть применен и к природному кристаллу тоже, все опять же зависит от задачи. И, конечно, нельзя забывать о геологических методах, применяемых уже не к отдельному кристаллу, а к их сообществу, к минеральной ассоциации, к горной породе, к руде.

— Ограничен ли запас минералов? Или их можно считать возобновляемым ресурсом?

— Этот вопрос отчасти философский. Если мы говорим о каком-то отдельном минерале или же о полезном ископаемом, то традиционно считается, что минералы невозобновляемые. Ведь минерал образовался в природе, лежал, условно говоря, в земле, а потом его нашли, добыли, переработали, и вот его нет. Единственный способ бороться с этой невозобновляемостью — сохранить минерал в коллекции, поставить его в музейную витрину.

Однако есть исключения. Например, удивительный минерал — рениит, содержащий большое количество редчайшего элемента рения. На острове Итуруп, на Курилах, есть вулкан по имени Кудрявый. Это потрясающий вулкан с поразительными фумарольными полями. Именно здесь из газа осаждается, причем и в настоящее время, минерал рениит, сульфид рения, описанный не так давно нашими коллегами. Рений — очень дорогой



Действующая высокотемпературная (500–600° С) фумарола на свежем, недавно застывшем потоке базальтовой лавы. В местах выхода на поверхность горячего вулканического газа образуются красные и желтые минеральные корки, сложенные разнообразными хлоридами и сульфатами. Вулкан Толбачик, Камчатка: извержение 2012–2013 гг. Фото: Д.А. Ханин, июль 2013 г.

элемент. Когда-то даже обсуждался проект по добыче рениита из фумарол вулкана Кудрявый. Логика такая: газ из вулкана идет, значит, через какое-то время после предполагаемой добычи рениит нарастет снова. Действительно, он нарастет, но, видимо, не в промышленных масштабах...

Другой пример, наиболее очевидный, — добыча солей из озер: сегодня соль вычерпали, завтра на ее месте образовалась новая. Но это скорее исключения, поскольку, к сожалению, неживая природа в общем случае не умеет себя быстро воспроизводить. То есть, возможно, процесс идет, да только нам об этом неизвестно: наша жизнь и геологические процессы текут в разных временных масштабах.

Помимо этого существует такое понятие, как «известные запасы». Скажем, найдено некое месторождение. Постепенно его отработали, все ценное добыли. Найдём ли мы еще такое месторождение, неизвестно. В том числе поэтому так важна музейная деятельность. Мы уже научились сохранять редких животных в заповедниках, а также воспроизводить их в зоопарках и выпускать потом в дикую природу. С минералами, к сожалению, это не проходит. Восстановить отработанное месторождение, как правило, невозможно, и сохранять такие фрагменты неживой природы можно, по сути, только *ex situ* — в коллекциях.

— Почему вы стали заниматься минералогией?

— Меня с самого детства привлекали все природные объекты: растения, животные, минералы. В возрасте восьми лет я начал собирать и приносить домой разные найденные под Москвой камни. Конечно, стало интересно, что же я нашел. За ответом пришел сюда — в Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана. И мне немного рассказали о том, что, собственно говоря, у меня в руках. Более того, показали небольшую «свалочку» за музеем. Раньше здесь же располагалось Бюро минералов, которое готовило учебные коллекции для разных научных и образовательных организаций. Каменный материал для коллекций специальным образом обрабатывался, дробился, а ненужные обломки попросту выбрасывались. Там я, конечно, нашел для себя кое-что интересное. Затем я пошел в геологический кружок школьного факультета при Московском геологоразведочном институте, а после поступил на геологический факультет МГУ, хотя на примете у меня был еще и химический факультет. Но все-таки к природе ближе геология.

— Каковы задачи современной минералогии?

— Как и в любой другой научной дисциплине, фундаментальная задача связана с получением нового знания, причем самого разнообразного — и того, которое может пригодиться человеку буквально завтра, а возможно, и сегодня вечером, и того, у которого нет очевидных прикладных аспектов.


К тому же, как давно замечено, у человека есть такая особенность: ему хочется знать, что вокруг него. Это вопрос культуры, а наука — часть общей культуры. Фундаментальные задачи минералогии связаны с получением нового знания о минералах, о минеральных ассоциациях — сообществах минералов, о проблемах происхождения минералов. И каждый новый минерал — это кирпичик нового знания. Академик Н.П. Юшкин, к сожалению, покинувший нас несколько лет назад, четко сформулировал мысль: уровень развития минералогии определяется тем количеством минералов, которое на данный момент известно науке. Минерал как таковой был и остается связующим звеном между геологическими и физическими дисциплинами. Мы можем углубляться в свойства кристалла, которые подскажут нам, как его использовать, а можем подробнее изучить, где и почему минерал образуется, почему он возникает в большом или малом количестве. Это уже приближает нас к области учения о полезных ископаемых. Напомню, что любая руда — это сообщество минералов. Одни из них полезные — те, из которых можно извлекать нужные компоненты, другие — формально бесполезные (по крайней мере сегодня), третьи — вредные, они мешают нам извлекать полезный компонент, например сера или мышьяк в железных рудах. Важно понимать, почему тот или иной элемент вреден и как извлечь полезное. Этим занимается большой раздел минералогии под названием «технологическая минералогия».

На любом крупном руднике, где добываются сложные по минеральному составу руды, обязательно есть минералогическая лаборатория. Специалистам, которые там работают, природа постоянно подкидывает разные загадки. Скажем, в одном углу карьера представлена одна руда. Передвинулись на полсотни метров — другая, и вот уже та схема обогащения, которая была сформирована для первой руды, не годится, нужно разрабатывать новую.

Минералогия остается на службе у других геологических наук, в первую очередь, у геохимии. Множество задач ставит петрология. Прежде чем охарактеризовать горную породу или понять, как она возникает и эволюционирует в процессе последующих изменений, надо изучить, из чего она состоит, из каких минералов, каковы особенности этих минералов.


И, конечно, нельзя не отметить, что минералы — прекрасные создания природы. Когда вы придете в музей и увидите, например, невероятно красивую друзу александрита, равных которой нет нигде в мире, вы определенно и получите эстетическое удовольствие, и узнаете что-то новое об устройстве нашего мира. Это я вам могу обещать. ■

Беседовала Анастасия Пензина



ИНФЕКЦИОННЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ

Царство



Гриб *Candida auris* обживает больницы, заражая пациентов с ослабленным иммунитетом

убийц

Грибы, убивающие ежегодно 1,6 млн жителей нашей планеты, становятся одними из самых смертоносных микроорганизмов — и мы, по существу, не знаем, как остановить их нашествие

Мэрин Маккенна

ОБ АВТОРЕ

Мэрин Маккенна (Maryn McKenna) — журналистка, автор статей, посвященных вопросам здравоохранения, политики в области питания и др. Старший научный сотрудник Центра по исследованию здоровья человека при Университете Эмори. Последний ее труд — книга «Большая курица: невероятная история о том, как антибиотики создали современное сельское хозяйство и изменили способ питания в мире» (*Big Chicken: The Incredible Story of How Antibiotics Created Modern Agriculture and Changed the Way the World Eats*, 2017).



ла четвертая неделя июня 2020 г. — середина второй волны пандемии COVID-19 в США. Переболели 2,4 млн жителей страны, число умерших приближалось к 125 тыс. Том Чиллер (Tom Chiller), работающий дистанционно у себя дома в Атланте, оторвался от монитора и почесал бритую наголо голову.

Чиллер — врач-эпидемиолог; в обычное время он руководил подразделением в Центрах по контролю и профилактике заболеваний (CDC), которое занималось отслеживанием распространения грибковых инфекций, а в марте прошлого года вынужден был переключиться на другую тематику. К тому времени стали ясны масштабы бедствия, связанного с распространением нового вируса. В Нью-Йорке был объявлен локдаун, и руководство перевело почти всех сотрудников на дистанционный режим работы. В результате Чиллер включился в изнурительную борьбу против COVID-19 вместе с другими работниками системы здравоохранения. Он отслеживал сообщения о заболеваемости и смертности и размышлял о том, какие меры необходимо принять, чтобы добиться хоть какой-то безопасности.

Переборов себя, Чиллер вновь погрузился в работу. На этот раз ему предстояло разобраться с подборкой данных, составленной одним из его сотрудников, и эти сведения повергли его в шок. Госпитали в пригороде Лос-Анджелеса, переоборудованные под лечение инфицированных COVID-19, сообщали о новой напасти: у некоторых пациентов, помимо вирусной, развилась другая инфекция, а именно вызванная грибом *Candida auris*.

Чиллер знал об этом грибе все — больше, чем кто-либо другой в США. Примерно четыре года назад руководство CDC разослало по больницам бюллетень с призывом быть начеку. В США гриб *Candida auris* пока не был обнаружен, но Чиллер знал о его

распространении в других странах и слышал, что происходит, когда этот микроорганизм попадает в лечебные учреждения. Этот патоген устойчив к большинству новых антибиотиков. Он прекрасно размножается на холодных твердых поверхностях, и на него не действуют дезинфицирующие агенты, которыми обрабатывают медицинские инструменты. Некоторые больницы, где обнаружен этот гриб, вынуждены демонтировать оборудование и ликвидировать межпалатные перегородки. Он вызывает быстро распространяющиеся вспышки инфекции и уносит жизни двух третей зараженных.

Вскоре после рассылки бюллетеня *C. auris* появился в США. К концу 2016 г. он был обнаружен у 14 жителей страны, четверо из них умерли. С тех пор CDC внимательно следят за его распространением, обязав врачей и органы здравоохранения на местах сообщать агентству о каждом инциденте. К началу нынешнего года число инфицированных превысило 1,5 тыс. в 23 штатах. Затем разразилась пандемия COVID-19 и произошло все, что с ней связано: переполнение больниц, высокая смертность, переориентация всей системы здравоохранения на борьбу с новым вирусом и отвлечение сил и средств от других инфекционных заболеваний.

С самого начала пандемии Чиллер осознал, какую опасность для человечества представляет наложение этих двух инфекционных заболеваний. В первых же статьях о вспышке новой болезни, опубликованных



Photograph by Timothy Archibald

В сентябре 2018 г. Торренсу Ирвину показалось, что он заболевает. «Простудился», — подумал он. Но спустя семь месяцев дыхательная способность легких у него уменьшилась на 75%. Оказалось, что у Ирвина равнинная лихорадка. Его жизнь была спасена благодаря новому, еще не получившему одобрения препарату.

китайскими эпидемиологами в международных медицинских журналах, положение пациентов описывалось как катастрофическое: без адекватного лечения, подключенные к аппаратам искусственной вентиляции легких, напичканные лекарствами для подавления воспалительной реакции и бактериальной инфекции. Введение препаратов, повышающих иммунитет, могло спасти от вируса, но подавляло врожденные защитные механизмы, а антибиотики широкого спектра действия уничтожали полезные бактерии, которые сдерживали размножение патогенных микроорганизмов. Больные могли погибнуть от любой другой инфекции.

Чиллер с коллегами обратился к эпидемиологам своей страны и Европы с просьбой сообщать о любых признаках того, что COVID-19 создает почву для распространения смертельно опасных грибов, и получил известия из Индии, Италии, Колумбии, Германии, Австрии, Бельгии, Ирландии, Нидерландов и Франции, а также из разных штатов США. Первые признаки новой эпидемии наложился на пик пандемии COVID-19. Но возбудителем был не *C. auris*, а другой смертельно опасный гриб — *Aspergillus*.

«Он может появиться где угодно, — говорит Чиллер. — И мы понятия не имеем, как его остановить».

Мы относимся к патогенным грибам как к некоей досадной помехе: плесень на сыре, на обуви, засунутой глубоко в чулан, на влажной непросушенной одежде. Мы счищаем ее, не осознавая, что тем самым способствуем распространению этих микроорганизмов. Царство грибов включает примерно 5 млн видов — от обычных пекарских дрожжей до экзотических обитателей тропиков. Оно отличается от других царств по целому ряду признаков. В отличие от клеток человеческого тела у грибов вместо мембраны — клеточная стенка; в отличие от растений они не могут синтезировать питательные вещества; в отличие от бактерий их генетический материал упакован в клеточном ядре. Некоторые из этих признаков делают их похожими на нас — на клеточном уровне. Грибы разрушают скальные породы, снабжают питательными веществами растения, повреждают нашу кожу, засоряют кишечник, оставаясь при этом незамеченными и соседствуя с нами.

Сегодня это сосуществование все больше нарушается. Грибы распространяются за пределы тех климатических зон, где они

долгое время находились, осваивая новые пространства, приобретая новые свойства и способность сосуществования с другими видами. Они становятся все более опасными патогенами, угрожая жизни и здоровью людей в небывалых ранее масштабах.

Методы диагностики серьезных грибковых заболеваний весьма несовершенны, поэтому все имеющиеся оценки, скорее всего, занижены. Согласно одной из заслуживающих доверия, инфицированы примерно 300 млн жителей земного шара, а умирает ежегодно 1,6 млн — больше, чем от малярии, и примерно столько же, сколько от туберкулеза. По данным CDC, в США по поводу грибковых заболеваний ежегодно госпитализируют более 75 тыс. человек, еще 8,9 тыс. лечатся амбулаторно. Для врачей и эпидемиологов это неожиданные и вызывающие тревогу факты, поскольку считалось, что нас надежно защищает от инфицирования грибами не только иммунная система, но и то, что температура тела у человека выше, чем та, которая для грибов наиболее комфортабельна. Риск заражения открытых тканей с их более низкой температурой немного выше — вспомните о дрожжевой инфекции или стригущем лишае, — но у людей с нормальным иммунитетом, как полагали, вероятность инвазивной инфекции ничтожна.

Какая самонадеянность! «Мы знаем о грибах очень мало, — говорит Артуро Касадевалл (Arturo Casadevall), врач и молекулярный микробиолог из Школы общественного здравоохранения Блумберга при Университете Джонса Хопкинса. — Спросите любого прохожего, каких инфекционных болезней он больше всего опасается, и он скажет, что боится бактерий и вирусов. А о том, что кто-то умер от грибкового заболевания, он даже не слышал».

По иронии судьбы восприимчивости к грибам способствовали достижения медицины. Эти микроорганизмы успешно используют любые бреши в нашей иммунной системе, но до середины XX в. люди с иммунной недостаточностью долго не жили. С тех пор медицина шагнула далеко вперед в отношении поддержания жизни людей, чья иммунная система ослабла в результате тех или иных заболеваний, противораковой терапии или в связи с возрастом. Разработаны методы подавления иммунитета у пациентов, которым предстоит трансплантация органов, или у людей с аутоиммунными заболеваниями (волчанкой, ревматоидным артритом и др.). В результате расширился круг людей с пониженным иммунитетом,

Резистентные грибы-убийцы атакуют

Гриб *Candida auris*, одна из разновидностей дрожжей, впервые появился в конце 1990-х гг. и быстро распространился по всему земному шару. Смертельно опасный для человека, он убивает две трети инфицированных. Его споры, попав в кровь, поражают самые разные органы. По данным проведенного в 2020 г. исследования, *C. auris* обнаружен в 19 странах шести континентов. Все грибы этого вида можно разделить на шесть групп (клад), различающихся генетически. Члены каждой клады устойчивы по меньшей мере к одному противогрибковому препарату из трех разных классов*: азолам, полиенам и эхинокандинам. Многие устойчивы к двум препаратам, а небольшое число представителей клады I — к трем.

*Препараты еще двух классов не применялись для борьбы с инфекцией этого типа.

Страны, в которых проведено тестирование образцов *C. auris*



высококочувствительных к грибковой инфекции. (Кстати, именно в ходе борьбы с пневмонией, вызванной грибом *Pneumocystis carinii*, 40 лет назад был идентифицирован вирус иммунодефицита человека.)

Распространение патогенных грибов происходило и по другим причинам. Человек вырубал леса, расширяя площади пахотных земель, нарушая равновесие, сформированное между грибами и их хозяевами; перевозил зараженные продукты и животных через океаны; обрабатывал сельскохозяйственные культуры фунгицидами, что приводило к появлению резистентных к ним разновидностей грибов. Деятельность человека стала причиной глобального потепления, грибы приспосабливались к более высоким температурам, что сужало разрыв между предпочитаемой ими температурой и температурой нашего тела — разрыв, долгое время защищавший человечество.

Не следует думать, что грибы ворвались в наш быт внезапно. Человек жил с ними бок о бок всегда. Грибами была насыщена среда его обитания — и не только. Некоторые виды жили внутри нас. Сегодня каждый человек ежедневно вдыхает не менее 1 тыс. спор грибов. Возвести стену между нами и царством грибов невозможно. Но ученые не прекращают попыток понять, как были повреждены системы организма, защищающие человека от этих микроорганизмов, и как их можно восстановить.

Удивительно, что люди так долго не задумывались о той опасности, которую представляют для них грибы, при том что веками они уничтожали культурные растения. В 1840-х гг. грибоподобный микроорганизм *Phytophthora infestans* уничтожил в Ирландии все картофельные поля; более миллиона человек — одна

SOURCE: "TRACING THE EVOLUTIONARY HISTORY AND GLOBAL EXPANSION OF CANDIDA AURIS USING POPULATION GENOMIC ANALYSES," BY MARGY A. GION ET AL., IN AMERICAN SOCIETY FOR MICROBIOLOGY, VOL. 117, APRIL 20, 2020. Graphic by Amanda Montañez

Этот смертоносный дуэт поражает все больше людей. *Coccidioides immitis* вызывает равнинную лихорадку и распространяется за пределы Юго-Запада США, где он впервые был обнаружен (1). *Aspergillus fumigatus* встречается в разных климатических зонах и может быть смертельно опасен для людей, переболевших гриппом или COVID-19 (2).

восьмая населения страны — умерли от голода. В 1870-х гг. ржавчинный гриб *Hemileia vastatrix* опустошил кофейные плантации в Южной Азии. Производители кофе в Индии и Шри-Ланке были разорены, основными его производителями стали страны Центральной и Южной Африки. Грибы были причиной исчезновения американского каштана в Аппалачах в 1920-х гг. и вырубки миллионов засохших вязов в городах Америки в 1940-х гг. Ежегодно они уничтожают пятую часть мирового урожая зерновых.

Тем не менее многие годы микробиологи направляли все усилия на борьбу со вспышками грибковых заболеваний растений и им никогда не приходило в голову, что эта напасть может распространиться на животных, в частности на человека. «Фитопатологи и фермеры всегда воспринимали грибы как серьезную угрозу, — говорит Мэттью Фишер (Matthew S. Fisher), профессор эпидемиологии Имперского колледжа Лондона, который занимается изучением процессов распространения патогенных грибов. — Их возможная опасность для животного мира не воспринималась ими всерьез».

Когда в Рио-де-Жанейро стали массово умирать уличные кошки, никто не задался вопросом почему. Обычно эти животные бегали повсюду, устраивали драки, ловили мышей и производили бесчисленное потомство. Но летом 1998 г. у десятков, а затем сотен из них стали появляться признаки какой-то непонятной болезни: мокнущие язвы на подушечках лап и ушах, опухшие слезящиеся глаза, выпадающая шерсть. Кошки в Рио жили в тесном соседстве с людьми. Дети играли с ними, а женщины — особенно в бедных кварталах — приручали их, чтобы они ловили крыс и мышей. Вскоре сходные болячки стали появляться у детей и женщин: округлые язвы с корочкой по краям на кистях рук, ярко-красные вздутия на предплечьях.

В 2001 г. сотрудники Фонда Освалду Крусса (FIOCRUZ) и больницы при нем, расположенных в Рио-де-Жанейро, подсчитали, что за три года к ним поступило 178 больных (в основном женщин) с мокнущими язвами и вздутиями на руках. Почти все они



каждый день контактировали с кошками. Анализ результатов обследований этих пациентов, а также кошек, лечившихся в находившейся по соседству ветеринарной клинике, показал, что всему виной — гриб рода *Sporothrix*. Его разновидности обитают в почве и древесине. Попав в тело животного через ранку или потертость на ноге, гриб приобретает споривидную структуру, напоминающую дрожжи. До этого дрожжевые формы не передавались от животного к животному, но позже это произошло. Кошки заражали друг друга во время драк, при спаривании, при чихании. К человеку возбудитель инфекции попадал через кошачьи царапины и укусы, из кожи он распространялся по всему телу, проникая в лимфатические узлы, кровеносные сосуды, внутренние органы. Бразильские врачи сообщали об обнаружении гриба в головном мозге некоторых больных.

Гриб с такими опасными свойствами выделили в особый вид, *Sporothrix brasiliensis*. К 2004 г. в больницах FIOCRUZ было пролечено 759 зараженных им пациентов, к 2011 г. их число достигло 4,1 тыс. К прошлому году по всей Бразилии было заражено 12 тыс. человек, болезнь распространилась на Парагвай, Аргентину, Боливию, Колумбию и Панаму.

«Эта эпидемия — не локальная вспышка, — говорит Флавиу Кейрос-Теллес (Flávio Queiroz-Telles), врач, доцент Федерального университета Параны в Куритибе, который впервые столкнулся с этой грибковой инфекцией в 2011 г. — Она постепенно расплзается».

Как именно, остается загадкой: уличные кошки — бродячие животные, но не на

В США ежегодно госпитализируют

75

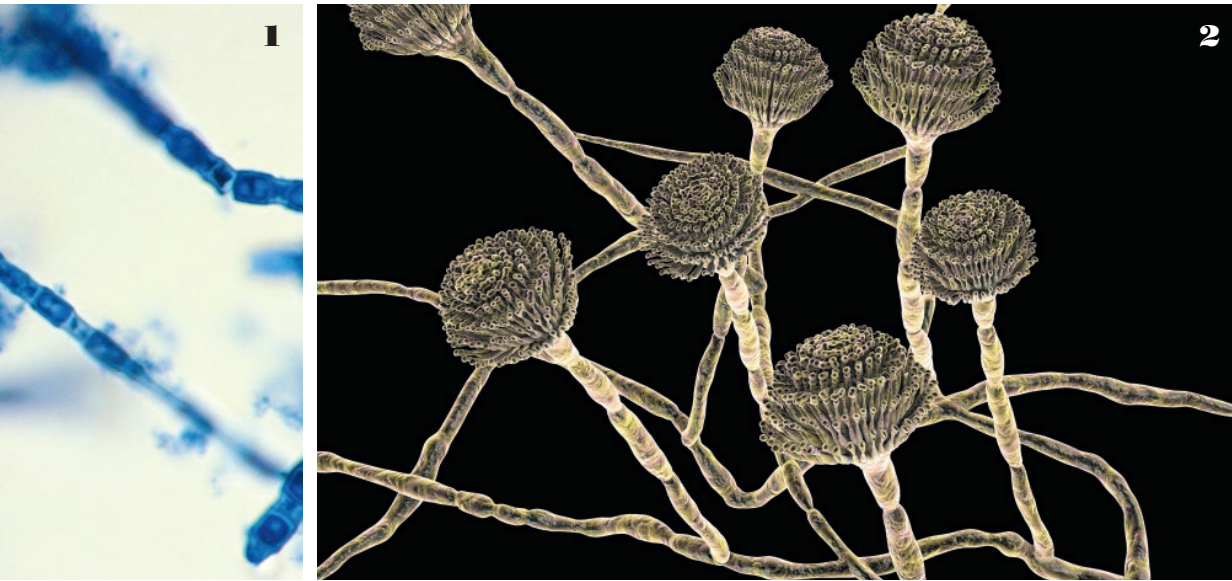
тыс.

человек с грибковой инфекцией,

8,9

млн

лечатся амбулаторно



тысячи же километров они совершают свои путешествия! Один из возможных ответов дали Чиллер с коллегами. В Бразилии и Аргентине споротрихоз распространен не только среди кошек, но и среди крыс. Инфицированные грызуны могли оказаться в грузовых контейнерах, перевозимых водным путем. Каждый день в американских доках их выгружают с кораблей миллионами. Так патогенные грибы могли попасть в США, а больные крысы — разнести инфекцию в припортовые города.

«В густонаселенных городских кварталах вам обязательно попадутся на глаза больные бездомные кошки, свободно разгуливающие по улицам, — говорит Джон Россоу (John Rossow), ветеринар из CDC, который одним из первых забил тревогу по поводу появления *Sporothrix* в США. — А поскольку всегда найдутся сердобольные люди, которые захотят помочь несчастным животным, нетрудно представить, что зараза перекинется на них».

Для Чиллера и его коллег-микологов опасность такого способа распространения очевидна. Царство грибов завоевывает все новые территории; его «подданные» пересекают любые границы, используя малейшую возможность в поисках новых организмов-хозяев. И в этом, как это ни печально, мы помогаем им сами. «Грибы живучи, их способность к адаптации очень высока, — говорит Чиллер. — На сегодня нам известно 300 патогенных видов, всего же существует несколько миллионов разновидностей этих микроорганизмов, а это огромный потенциал для появления новых опасных вариантов».

Торренсу Ирвину (Torrence Irvin) было 44 года, когда у него начались проблемы со здоровьем. Этот крупный мужчина, выделявшийся среди сверстников по колледжу и институту атлетическим телосложением, проживает в Паттерсоне, тихом городке, расположенном в Большой Калифорнийской долине. Около двух лет назад он купил дом в новом районе и переехал в него с женой Рондой и двумя дочерьми. Ирвин работал менеджером в ритейлерской компании *Crate & Barrel* и был комментатором юношеских футбольных матчей.

В сентябре 2018 г. он, как ему показалось, простудился. Какое-то время Ирвин принимал противопростудное средство, но спустя несколько недель у него появились слабость и одышка. Однажды в октябре он потерял сознание и рухнул на пол. Жена настояла на вызове скорой, Ирвина положили в больницу.

Врачи подумали, что у пациента пневмония, и, подлечив, через некоторое время выписали, снабдив антибиотиками и рекомендациями по приему бесчисленного множества других лекарств. Но слабость все увеличивалась, пропал аппетит, началась рвота. Ирвин обратился к другим врачам. Ему становилось все хуже, одышка усиливалась, появилась потливость, он терял в весе и выглядел как онкобольной. В конце концов очередное обследование показало, что причина всему — грибковая инфекция, кокцидиомикоз, или равнинная лихорадка. «Я и не знал, что такая болезнь существует», — говорит Ирвин.

Зато знали другие. Ирвина отправили в Калифорнийский университет в Дейвисе,

в 160 км от города, где он жил. Болезнь, диагностированная у Ирвина, встречалась в основном в Калифорнии и Аризоне, на юге Невады и западе Техаса. В этих регионах ее возбудители, грибы *Coccidioides immitis* и *Coccidioides posadasii*, инфицировали ежегодно примерно 150 тыс. человек, а в других местах о таком заболевании мало кто слышал. «Это не какой-то вездесущий патоген: вы не подхватите инфекцию в густонаселенных кварталах Нью-Йорка или Бостона, — говорит Джордж Томпсон (George R. Thompson), заместитель директора Медицинского центра в Дейвисе, лечащий врач Ирвина. — Поэтому даже медики считают ее каким-то экзотическим заболеванием. Но в эндемичных регионах она вполне обычна».

Как и *Sporothrix*, *Coccidioides* существует в двух формах. Исходная форма, обитающая в почве, имеет вид хрупких изломанных нитей; эти нити ломаются, когда разрушается почвенный покров. Летучие фрагменты разносятся в воздухе с ветром на сотни километров. Когда-то Ирвин вдохнул их — и в его организме они превратились в крошечные сферические споры, которые переместились с кровотоком в кости черепа и позвоночника. В качестве защиты в организме начала образовываться рубцовая ткань, препятствующая попаданию спор в легкие. К тому времени, когда Ирвин стал пациентом Томпсона, спустя семь месяцев после первого коллапса, у него функционировало всего 25% легких. Тем не менее Ирвин был счастлив: у каждого сотого инфицированно-го грибы прорастали в головной мозг.

Были испробованы все доступные способы лечения. Существует всего пять классов противогрибковых препаратов — очень мало по сравнению с 20 с лишним антибактериальными лекарствами. Отчасти дело в том, что сложно получить препарат, действующий только на грибы и не затрагивающий клетки человека, поскольку на клеточном уровне грибы и человек сходны.

Новый класс противогрибковых препаратов появляется на рынке примерно раз в 20 лет. Так, полиены, в частности амфотерицин В, синтезировали в 1950-х гг., азолы — в 1980-х, а эхинокандины, самый последний класс, — в 2001 г. (Есть еще тербинафин, используемый в основном при наружных инфекциях, и флуцитозин, применяемый в сочетании с другими лекарствами.)

Что касается Ирвина, то ни один препарат не был достаточно эффективен. «Я превратился в скелет, — вспоминает он. — Мой

дед, как-то раз навесивший меня в клинике, не мог сдержать слез. Мои дети не хотели меня видеть: им было страшно».

Отчаявшись, врачи решили попробовать только что созданный английскими фармацевтами препарат под названием «олорофим». Он еще не поступил в продажу, но организаторы одного клинического испытания включали в него пациентов, которым уже ничего не помогало. Очень скоро после того, как Ирвин стал его принимать, в течение болезни наступил перелом. Щеки у него округлились, он самостоятельно вставал на ноги, опираясь о ходунки. Через несколько недель Ирвина выписали.

Сегодня равнинная лихорадка диагностируется в восемь раз чаще, чем 20 лет назад. Это коррелирует с ростом числа сезонных мигрантов на Юго-Западе и Западном побережье (теперь там возводится больше домов, распаивается больше земель), а также с глобальным потеплением. «*Coccidioides* прекрасно себя чувствует во влажной почве; он не образует спор и потому не слишком опасен, — говорит Томпсон. — Споры образуются во время засухи, а за последнее время такое случается все чаще».

Поскольку равнинная лихорадка всегда была заболеванием, характерным для жарких стран, считалось, что жителям регионов с умеренным климатом она не грозит. Но все меняется. В 2010 г. ею заболели три жителя восточной части штата Вашингтон: 12-летний мальчик, который вместе с родителями путешествовал по одному из каньонов и вдохнул споры гриба; 15-летний юноша, упавший с квадроцикла; 58-летний строитель, у которого грибок проник в головной мозг. Из публикации двухлетней давности следует, что таких случаев может быть гораздо больше. Морган Горрис (Morgan Gorris) из Лос-Аламосской национальной лаборатории попытался оценить, какая часть территории США будет охвачена глобальным потеплением к концу столетия настолько, что эти регионы станут эндемичными относительно *Coccidioides*. Согласно разработанному им сценарию, при повышении среднегодовой температуры до 10,7° С и среднегодовом количестве осадков менее 600 мм благоприятная для гриба территория США достигнет канадской границы и охватит почти весь запад страны.

Выздоровление Ирвина растянулось почти на два года: он все еще принимает ежедневно шесть пилюль олорофима и готовится к тому, что это продлится до конца жизни. Он вернулся к своему прежнему весу, организм окреп, но легочная недостаточность

Ежедневно
каждый
житель
Земли
вдыхает

1

тыс.
спор
грибов

не ушла совсем и ему пришлось оформить инвалидность. «Я учусь жить с этим, — говорит он. — По-видимому, это навсегда».

S*porothrix* нашел новый способ передачи. Равнинная лихорадка распространяется на новые территории. *S. auris* использует возможности, открывшиеся в результате хаоса, который возник в ходе пандемии *COVID-19*.

Этот грибок уже имел дурную славу. Он вел себя иначе, нежели другие патогенные дрожжи, обитал в кишечнике человека, никак себя не проявляя до тех пор, пока иммунитет организма-хозяина не ослабевал; после этого грибок проникал в кровь или слизистые. А в первой декаде нынешнего века он начал передаваться от человека к человеку, приобрел способность выживать на металле, пластике и картоне. Когда в самом начале пандемии возник дефицит одноразовых масок и перчаток, медицинским работникам пришлось использовать их повторно, чтобы не заразиться самим. И *S. auris* был тут как тут.

Врач и микробиолог из Нью-Дели Анурадха Чоудхари (Anuradha Chowdhary), прочитав сообщения о первых случаях заражения новым коронавирусом, обеспокоилась тем, что *COVID-19* сочтут таким же воспалительным заболеванием, как респираторная инфекция. Обычно для подавления воспаления в таких случаях пациентам назначают стероиды. И она поняла, что такая мера расчистит путь *S. auris*, высоколетальному и вездесущему грибку, который к тому времени был обнаружен в больницах 40 стран по всем континентам за исключением Антарктики. Если медики станут невольными переносчиками этого патогена и он расплодится по всем лечебным учреждениям, это будет катастрофой. «Я подумала: отделения интенсивной терапии будут переполнены, и если в каком-то из них уже есть *S. auris*, пациентов ждет неминуемая смерть».

Чоудхари поделилась своими опасениями с коллегами, направив статью в один из медицинских журналов еще в начале пандемии, а через несколько месяцев привела новые данные: отделение интенсивной терапии на 65 коек в одной из больниц Нью-Дели заражено *S. auris* и две трети пациентов с *COVID-19* умерли. Что касается США, то в бюллетене, который получил Чиллер, сообщалось о нескольких сотнях инцидентов в больницах и поликлиниках Лос-Анджелеса и округа Ориндж, а в одном только госпитале во Флориде их было уже 35.

Но это еще не все. Врачи, имеющие дело с грибковыми заболеваниями, видели признаки еще одной напасти: распространения другого гриба, перед которым благодаря *COVID-19* открылись новые горизонты.

В природе *Aspergillus fumigatus* играет роль чистильщика. Он способствует гниению погибающих деревьев и опавших листьев. В медицине этот грибок известен как возбудитель оппортунистической инфекции, которая развивается, когда ослабленная иммунная система не справляется с попавшими в организм спорами. У тяжелобольных смертность от инвазивного аспергиллеза достигает 100%.

В период эпидемии птичьего гриппа в 2009 г. у *Aspergillus* появились новые жертвы — вполне здоровые люди с единственным недавно перенесенным заболеванием: гриппом. В больницы Нидерландов стали поступать пациенты с затрудненным дыханием, близкие к шоковому состоянию. Не прошло и несколько дней, как все они умерли. К 2018 г. у каждого третьего больного с гриппом был диагностирован инвазивный легочный аспергиллез, две трети из них умерли.

Вскоре началась пандемия *COVID-19*. У заболевших наблюдались такие же легочные симптомы, как при гриппе. Сети предупреждения пестрели сообщениями о бесчисленном числе случаев аспергиллеза у больных коронавирусной инфекцией. Сообщения приходили из Китая, Франции, Бельгии, Германии, Нидерландов, Австрии, Ирландии, Италии, Ирана. *Aspergillus* вызывал такие же осложнения, как и *S. auris*, но был еще опаснее. Последним можно заразиться в больницах, а *Aspergillus* — где угодно. От спор невозможно изолироваться.

У врача Кирен Марр (Kieren Marr) из Балтимора есть особенно веские причины для беспокойства. Она работает в Медицинском центре Джонса Хопкинса и руководит отделом по изучению инфекционных заболеваний, которые угрожают онкологическим больным и пациентам, перенесшим трансплантацию органов. Когда разразилась пандемия *COVID-19*, Марр тут же вспомнила об *Aspergillus* и подумала, что в больницах США, персонал которых незнаком с угрозой, исходящей от этого гриба, пропустят случайное заражение им. В Медицинском центре Джонса Хопкинса начали тестировать больных коронавирусной инфекцией, находящихся в отделении интенсивной терапии, теми же методами, какие применялись в Европе, стараясь выявить

грибковую инфекцию как можно раньше. Оказалось, что каждый десятый пациент, находящийся в тяжелом состоянии, заражен *Aspergillus*. Несколько таких больных умерли, у одного из них грибок проник в головной мозг. Марр полагала, что по всей стране таких случаев гораздо больше, но инфекция не была диагностирована. «Это крайне тревожно, — заявила Марр этой весной. — *Aspergillus* особенно опасен сейчас, во время пандемии, в этом нет никаких сомнений».

Нашествию грибов трудно противостоять не только вследствие их высокой вирулентности и скрытности. За время своего «сожительства» с человеком они выработали устойчивость к лекарственным препаратам, с помощью которых с ними пытались бороться.

Это похоже на историю с антибиотиками. Фармацевты «играют в чехарду» с бактериями, пытаясь обогнать в поисках новых антибиотиков процесс создания микробами защитных механизмов. Но ситуация с патогенными грибами еще хуже. Они тоже вырабатывают резистентность к противогрибковым препаратам, но беда в том, что этих препаратов исходно очень мало, поскольку угроза была осознана относительно недавно.

«В начале 2000-х, когда я оставил занятие чистой наукой и перешел в промышленность, никакого производства по синтезу противогрибковых препаратов не существовало», — говорит Джон Рекс (John H. Rex), врач по образованию, главный медицинский эксперт компании F2G, занимающийся синтезом пока не получившего одобрения Управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA) США препарата, которым лечится Торренс Ирвин.

Сегодня ситуация несколько иная, но исследования идут медленно. Между тем разработка новых противогрибковых средств просто необходима, поскольку пациентам приходится принимать такие средства месяцами, иногда и годами, а многие из имеющихся препаратов токсичны. «Врач должен делать выбор между борьбой с грибковой инфекцией и сохранением почек пациента, — объясняет Сиара Кеннеди (Ciara Kennedy), президент компании *Amplyx Pharmaceuticals*, — но если не бороться с инфекцией, то пациент неизбежно умрет».

Новые препараты жизненно необходимы еще и потому, что старые становятся недейственными. Ирвин согласился принять участие в клинических испытаниях олорофима потому, что ни одно из существовавших

на тот момент лекарств ему не помогало. *S. auris* уже резистентен ко всем трем классам противогрибковых препаратов, а *Aspergillus* — к наиболее широко используемому классу: азолам. Их применяют по всему земному шару не только в сельском хозяйстве для обработки зерновых культур, но и для дезинфекции изделий из металла, пластика и строительных материалов. Пока грибы в «игре в чехарду» побеждают.

Оптимальный способ борьбы с грибами — не их уничтожение, а вакцинация населения. На сегодня никаких противогрибковых вакцин не существует. А между тем трудности с длительным лечением больных токсичными препаратами и рост заболеваемости делают их разработку в высшей степени актуальной.

Причина, по которой равнинная лихорадка не косит всех подряд (хотя 10% населения США проживают в эндемичных регионах), состоит в том, что у инфицированных вырабатывается долговременный иммунитет. Это означает, что вакцина против этого заболевания может быть эффективной, именно потому иммунологи бьются над ее созданием с 1940-х гг. Блестящие результаты дала в опытах на мышах вакцина на основе убитых спор *Coccidioides*, однако клинические испытания, проведенные в 1980-х гг., показали, что для человека она неэффективна. «Мы испытывали ее на малобюджетной основе и надеялись, что она работает», — говорит Джон Гальджани (John Galgiani), директор Центра передового опыта по равнинной лихорадке при Медицинском колледже Аризонского университета, один из организаторов испытаний сорокалетней давности.

А теперь обратимся к ситуации с собаками. Эти животные, как хорошо всем известно, обнюхивают все подряд, и риск заболеть равнинной лихорадкой для них гораздо выше, чем для человека. В одном из округов Аризоны от нее ежегодно умирает 10% собак, и вероятность того, что у них разовьется тяжелая легочная недостаточность, выше, чем у людей. Этот факт в сочетании с пониженными требованиями к применению новых лекарственных средств в случае животных позволяет использовать собак в качестве модели для испытания вакцин. Добавьте сюда привязанность владельцев собак к своим питомцам и готовность потратить на них кругленькую сумму.

Сегодня Гальджани с коллегами при финансовой поддержке сотен владельцев собак и благодаря получению гранта

Число известных видов грибов:

5

млн

Число известных видов, вызывающих заболевания у человека:

300

от Национальных институтов здоровья (а также помощи калифорнийской компании *Anivive Lifesciences*) работают над созданием вакцины другого типа. Тестирование не завершено, но есть надежда, что вакцина появится уже в следующем году. «Я думаю, это стоящая идея — сначала испытать вакцину на собаках, чтобы убедиться в ее безопасности, — говорит Лиза Шубиц (*Lisa Shubitz*), ветеринар, научный сотрудник исследовательского центра в Аризоне. — Это реальный шаг к созданию противогрибковой вакцины для человека».

В новой версии используют не убитые споры возбудителя равнинной лихорадки, а живые грибы, из генома которых удален ген *CPS1*, контролирующий репродуктивный цикл. Этот ген идентифицировала группа фитопатологов, а затем его изолировал Марк Орбах (*Marc Orbach*) из Аризонского университета, который изучает взаимодействие между патогеном и организмом-хозяином. Мутантную форму *Coccidioides* с удаленным *CPS1*-геном Гальджани с коллегами ввели лабораторным мышам — и получили мощный иммунный ответ в виде активации хелперных *T1*-клеток. Мыши прожили после этого шесть месяцев. Никаких симптомов, характерных для равнинной лихорадки, у них не наблюдалось, хотя исследователи пытались инфицировать их немутантным грибом. При аутопсии животных не обнаружилось никаких следов патогена в легких. Выработка столь мощного долговременного иммунитета позволяет надеяться, что на основе гриба с удаленным *CPS1*-геном Гальджани с сотрудниками удастся создать вакцину, эффективную в случае человека, но процесс этот будет долгим.

Вакцина для собак находится в юрисдикции Министерства сельского хозяйства США, а одобрение на применение «человеческой» вакцины дает *FDA*. Для этого вакцина должна пройти клинические испытания, на что потребуется несколько лет и участие тысяч добровольцев, в то время как тестирование «собачьих» вакцин проводится на небольших группах животных. В отличие от прототипа вакцины 1980-х гг. новая вакцина основана на живых микроорганизмах. Поскольку одобрения не получил ни один из кандидатов, у разработчиков и регулирующих органов нет никаких ориентиров, которые помогли бы прикинуть, когда новая вакцина появится на рынке. «Мы одновременно планируем наши действия и реализуем эти планы», — говорит Гальджани.

По его оценкам, «человеческая» вакцина против равнинной лихорадки поступит на рынок только через пять-семь лет, а на ее создание потребуется примерно \$150 млн, при этом нет никакой гарантии, что деньги не будут потрачены впустую. Но если разработчикам улыбнется удача, это защитит жителей Юго-Запада США и военнослужащих 120 баз, расположенных в этом регионе, а также сотни тысяч сезонных мигрантов. (Три года назад *CDC* зафиксировал заболевание равнинной лихорадкой в 14 штатах за пределами эндемичной зоны. Большинство заболевших посещали юго-западные регионы в зимнее время.) По одной из оценок, вакцина позволила бы системе здравоохранения ежегодно экономить \$1,5 млрд.

«Десять лет назад мы не видели никаких перспектив относительно создания противогрибковой вакцины, — резюмирует Гальджани. — По моему мнению, сегодня такие перспективы прослеживаются».

Как только появится первая противогрибковая вакцина, за ней последуют и другие. Если вакцинация будет успешной, человечество избавится от страха перед нашествием грибов. Мы научимся существовать с ними, не опасаясь вспышек заболевания.

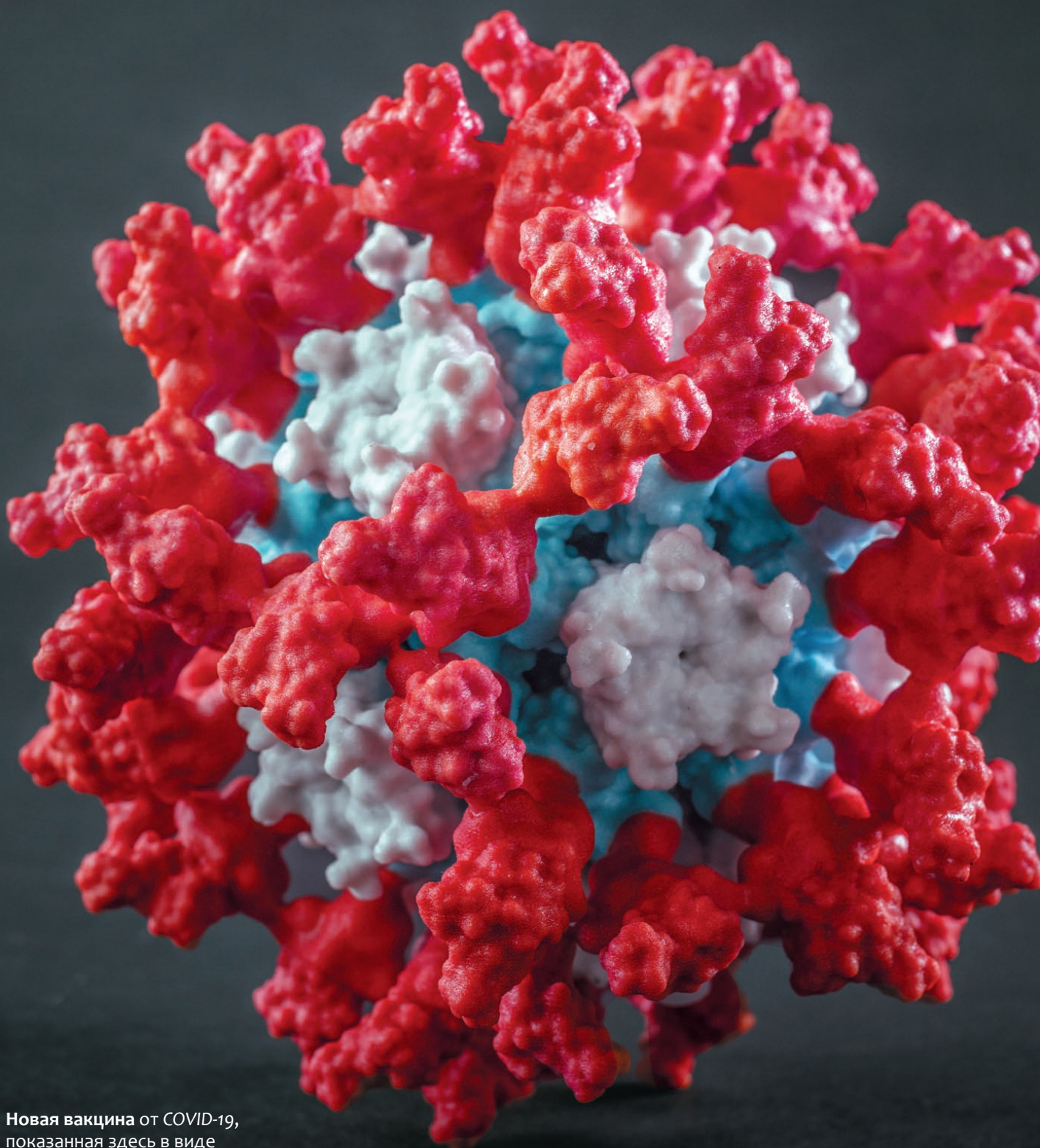
Но с течением времени грибы видоизменяются: они осваивают новые местообитания, по-другому себя ведут, используют возможности, которые открываются перед ними в связи с такими событиями, как пандемия *COVID-19*, когда их жертвами становятся ослабленные люди. Чиллер, будучи экспертом Центров по контролю и профилактике заболеваний, крайне обеспокоен.

«Последние пять лет мы живем с ощущением, что наступила новая реальность — господство царства грибов, — говорит он. — Сможет ли человечество противостоять новой напасти? Что окажется следующей угрозой его существованию? Для нас все эти вопросы — вовсе не чисто академические, мы должны готовиться к новым сюрпризам». ■

Перевод: Н.Н. Шафрановская

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Фрезер Д. Грибы атакуют // *ВМН*, № 2, 2014.



Новая вакцина от COVID-19, показанная здесь в виде трехмерной модели, была создана на основе искусственной белковой наночастицы и предназначена для получения мощной иммунной защиты

БИОХИМИЯ

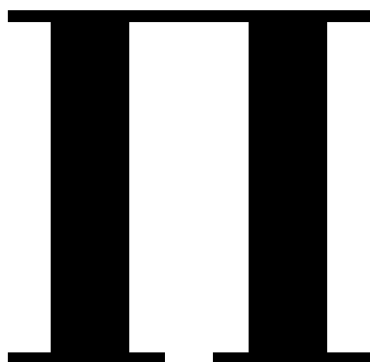
ЖИЗНЬ, НОВАЯ *и* улучшенная

Все процессы в нашем организме регулируются природными белками. Теперь исследователи научились создавать белки искусственно. Благодаря данному достижению получена новая вакцина от *COVID-19* и, возможно, произойдет революция в биологии

Роуэн Джейкобсен

ОБ АВТОРЕ

Роуэн Джейкобсен (Rowan Jacobsen) — журналист и автор нескольких книг, среди которых «Тени на заливе» (*Shadows on the Gulf*, 2011) и «Трюфельная гончая» (*Truffle Hound*, 2021). Среди его многочисленных журнальных статей в *Scientific American* были опубликованы «Цветы-призраки» (ВМН, № 4, 2019) и «Неуязвимые клетки» (ВМН, № 8–9, 2019). В 2017–2018 гг. он был стипендиатом программы научной журналистики *Knight Science Journalism* в Массачусетском технологическом институте.



Одним вечером в апреле 2020 г. сидящая в одиночестве в лаборатории Вашингтонского университета Лекси Уоллс (Lexi Walls) с беспокойством ожидала результатов самого важного эксперимента в своей жизни. Уоллс — молодой специалист по структурной биологии, эксперт по коронавирусам, в течение последних трех месяцев день и ночь работавшая над созданием нового типа вакцины против патогена, посеявшего хаос на планете. Она надеялась, что в случае успеха ее подход не только поможет укротить *COVID-19*, но и произведет революцию в вакцинологии, позволив эффективно бороться со многими инфекционными заболеваниями — от гриппа до СПИДа. В отличие от всех вакцин, используемых ранее, эта была получена не из природных компонентов, а из искусственных микроскопических белков, спроектированных на компьютере. Их создание — возможность перестраивать природу.

Белки — это сложные наномашинны, которые постоянно взаимодействуют друг с другом и выполняют большинство задач в живых организмах. Они переваривают пищу, борются с инфекцией, устраняют повреждения, воспринимают и передают сигналы из окружающей среды, осуществляют действия, помогают думать и участвуют в размножении. Они состоят из длинных цепочек более простых молекул, называемых аминокислотами, скручиваются и складываются в чрезвычайно сложные трехмерные структуры, подобно оригами. Их формы зависят от порядка и количества различных используемых аминокислот, которые могут обладать отталкивающими или притягивающими свойствами. Их взаимодействия настолько сложны, а масштаб так мелок (в среднем в клетке содержится 42 млн белков), что мы долгое время не могли понять принципы, по которым они спонтанно и стабильно сворачиваются из нитей в нужную форму. Многие специалисты предполагали, что мы не узнаем этого никогда.

Однако новые наблюдения и открытия в области искусственного интеллекта позволяют

заставить белок раскрыть свои секреты. Сейчас ученые разрабатывают биохимические инструменты, которые изменят наш мир. С их помощью мы сможем использовать белки для создания нанороботов, которые будут бороться с инфекционными заболеваниями на уровне одиночных молекул, посылать сигналы по организму, разрушать токсичные вещества или улавливать свет. Мы можем создавать биологические молекулы с определенной задачей.

Уоллс находится на переднем крае этих исследований. В декабре 2019 г. она защитила диссертацию, темой которой была структура коронавируса, тогда этим мало кто занимался. «На протяжении пяти лет я пыталась убедить людей в важности проблемы коронавируса, — рассказывает она. — В начале защиты я сказала, что собираюсь объяснить, почему это семейство вирусов потенциально может вызвать эпидемию, к которой мы не готовы. К сожалению, в итоге мое предсказание сбылось».

Когда в конце декабря 2019 г. из китайского Уханя просочились слухи о загадочной новой пневмонии, Уоллс заподозрила коронавирус.



Разработчики вакцины Лекси Уоллс (слева) и Брук Фиала (справа) использовали специально изготовленные белки для получения новой многообещающей прививки от COVID-19. За счет размахивания уязвимым участком вируса SARS-CoV-2 перед клетками иммунной системы провоцируется сильная нейтрализующая реакция.

10 января 2020 г. был опубликован в публичном доступе геном SARS-CoV-2. Уоллс и руководитель ее лаборатории в Вашингтонском университете биохимик Дэвид Вислер (David Veelsler) просидели всю ночь над его анализом. Уоллс говорит, что почувствовала потрясающую сосредоточенность, что-то вроде: «Хорошо, мы знаем, что делать. Давайте сделаем это».

Как и другие коронавирусы, SARS-CoV-2 похож на шарик, покрытый белковыми «шипами». У каждого шипа на конце есть участок, который называется рецептор-связывающим доменом (RBD), он состоит из группы аминокислот, расположение и заряды которых идеально сочетаются с белком-рецептором на поверхности человеческих клеток. Вирусный белок стыкуется с рецептором, как космический корабль, и вирус использует это соединение, чтобы проскользнуть внутрь клетки и размножиться.

Поскольку RBD играет такую вредную роль, антитела иммунной системы атакуют его в первую очередь. Это тоже белки, организм создает их, чтобы они связывались с RBD и выводили его из строя. Но специализированным клеткам нужно некоторое время, чтобы выработать достаточное количество эффективных антител, и за этот период вирус зачастую успевает нанести серьезный ущерб.

Первое поколение вакцин от COVID-19, в том числе спасительные мРНК-вакцины, действуют за счет введения в организм белка шипа вместо живого коронавируса, так что иммунная система учится узнавать RBD и «мобилизовать войска». Но RBD может укрываться за другими участками белка шипа, защищающими домен от антител, которые хотят с ним связаться. Это делает иммунный ответ менее эффективным. Кроме того, свободно плавающий белок шипа непохож на настоящий вирус и не всегда запускает сильную иммунную реакцию, если не используются большие дозы вакцины. Большой объем дозы увеличивает стоимость и может вызывать сильные побочные эффекты.

Какими бы удачными ни были вакцины от COVID-19, многие специалисты считают использование природных белков временным методом. «Становится ясно, что простого введения естественных или стабилизированных белков недостаточно», — поясняет Рино Раппуоли (Rino Rappuoli), главный научный сотрудник и руководитель отдела разработки вакцин в крупнейшей британской фармакологической компании *GlaxoSmithKline* (GSK). Большинство современных вакцин, как от детских болезней,

так и от гриппа, содержат белки естественного происхождения, которые вакцинологи называют иммуногенами. «Нам необходимо создать иммуногены, которые были бы лучше естественных», — говорит Раппуоли.

У Уоллс и Вислера возникла идея. А что если вместо целого шипа предъявить иммунной системе только кончик RBD, который не был бы закрыт никакой защитой? «Мы захотели показать иммунной системе главный компонент, объяснить, на что именно ей надо реагировать», — рассказывает Уоллс.

Сложность заключалась в том, что у биологических существ не образуются изолированные RBD и этот участок слишком мал и незнаком, чтобы привлечь к себе внимание иммунной системы. Однако Уоллс и Вислер знали нескольких человек, способных помочь в решении проблемы. Неподалеку располагалась лаборатория Института белкового дизайна Вашингтонского университета. В институте про сворачивание белка понимали достаточно, чтобы спроектировать и создать несколько сотен простых маленьких белков, значительно меньше тех, что когда-либо встречались в живых организмах, но складывающихся в определенную форму с предсказуемыми функциями.

В 2019 г. группа ученых из этой лаборатории под руководством биохимика Нила Кинга (Neil King) сконструировала два крошечных белка с подходящими друг другу поверхностями, которые при смешивании в растворе соединялись и самособирались в наночастицы. Эти шарики были размером с вирус, а их структуру можно было подкорректировать с помощью простых изменений в генетической последовательности. Когда ученые украсили данные частицы 20 белковыми шипами от респираторно-синцитиального вируса, который представляет собой вторую по значимости причину детской смертности в мире, в первоначальных тестах частицы вызвали внушительный иммунный ответ.

Уоллс и Вислер подумали: почему бы не попробовать использовать аналогичные наночастицы для вакцины от SARS-CoV-2, взяв RBD вместо целого белка шипа? Наночастицы с фрагментом белка имеют еще и то преимущество, что производство вакцин такого типа дешевле и быстрее, чем тех, где используется убитый или ослабленный вирус. Кроме того, они будут храниться при комнатной температуре и их легче транспортировать, чем нежные мРНК-вакцины, которые необходимо держать в глубокой заморозке.

Уоллс связалась с Институтом белкового дизайна и в сотрудничестве со специалисткой по наночастицам Брук Фиалой (Brooke Fiala),

которая работала с Кингом, приступила к созданию прототипа — сферической наночастицы, содержащей 60 копий RBD. Ученые попытались сделать нечто необычное: вместо того чтобы прилепить RBD непосредственно на поверхность наночастицы, они прицепили их с помощью коротких нитей из аминокислот, наподобие воздушных змеев. Если дать RBD немного больше пространства, это позволит иммунной системе рассмотреть его со всех сторон и выработать антитела, которые смогут атаковать множество различных точек.

Однако никто не знал, сработает ли это. Поэтому в тот апрельский вечер в прошлом году Уоллс ждала результатов, скрестив пальцы на удачу. Тремя неделями ранее они с коллегами ввели некоторым мышам вакцину с наночастицами. Другие грызуны получили обычный белок шипа из других вакцин. Теперь ученые взяли у животных кровь и смешали ее с псевдовиром SARS-CoV-2 — искусственной, нереплицирующейся версией вируса, которую безопаснее использовать в лабораториях. Нужно было посмотреть, выработались ли у кого-нибудь из вакцинированных мышей антитела, которые могли бы заметить и нейтрализовать псевдовир.

Антителам требуется некоторое время, чтобы выполнить свою миссию, поэтому Уоллс пришлось ждать до позднего вечера. Она ни за что не согласилась бы поехать домой, провести в напряжении все выходные. Закрывая дверь, коллеги пожелали ей удачи. Перед уходом Вислер попросил связаться с ним сразу, как только будут результаты.

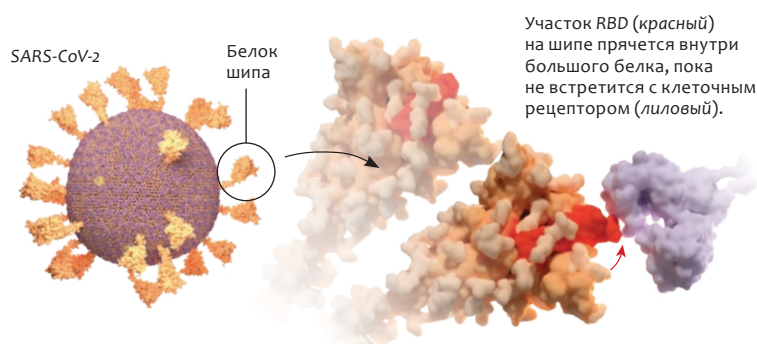
На улице уже стемнело, а в лаборатории царил призрачный тишина. Наконец пришло время посмотреть.

Уоллс включила установку, позволяющую обнаруживать и подсчитывать антитела, прикрепившиеся к вирусным частицам, глубоко вдохнула и взглянула на цифры.

Некоторым мышам вводили небольшое количество простого белка шипа, и это было абсолютно безрезультатно: нулевой эффект при взаимодействии с псевдовиром.

Выявление уязвимого места вируса

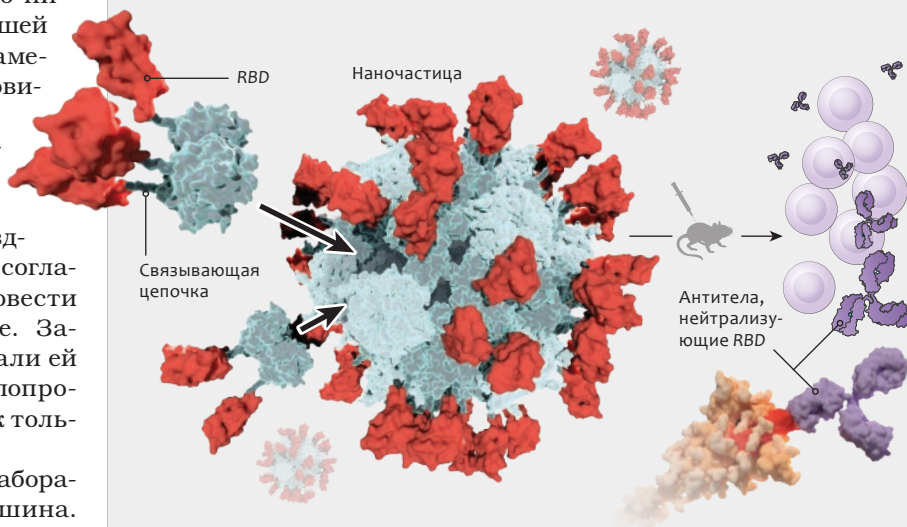
Вирус SARS-CoV-2 скрывает свои уязвимые участки. При использовании современных вакцин в организм вводится свободно плавающий белок шипа вируса, который должен запустить выработку антител. Но важная часть шипа, рецептор-связывающий домен (RBD), который прикрепляется к клеткам, обычно скрыт в складках большого белка. Поэтому иммунной системе сложно найти RBD и создать к нему антитела. Теперь разработчики вакцины выделили RBD и прицепили его к искусственной наночастице. Предполагается, что это обеспечит мощную выработку антител.



Введение мышам целого шипа вызывает умеренную реакцию иммунных клеток, вырабатывающих антитела.



В новой вакцине RBD свободно связан с самособирающейся искусственной наночастицей. RBD не защищен, поэтому антитела к нему вырабатываются лучше.



Те животные, которые получили большие дозы белка шипа, выработали антитела с умеренным нейтрализующим эффектом, это было сопоставимо с эффектом от некоторых других вакцин. Но мыши, получившие вакцину с наночастицами, полностью победили псевдовир. Антитела облепляли его и демонстрировали в десять раз более сильный



Для того чтобы заблокировать вирус, Лунсин Цао из Института белкового дизайна разработал маленькие искусственные белки, так называемые мини-связыватели. Они прилипают к той части коронавируса, которая прикрепляется к клеткам, и останавливают его. Мини-связыватели можно впрыскивать в нос для предотвращения заражения.

нейтрализующий эффект по сравнению с вакциной, содержащей большое количество белка шипа. Результат сохранялся, даже когда использовалась лишь мизерная доза. Перед Уоллс было то, что могло стать недорогой, хорошо хранящейся и сверхсильной вакциной.

Она отправила Вислеру сообщение, набранное заглавными буквами: «ОНИ НЕЙТРАЛИЗУЮТ!»

Вислер ответил: «В твоих руках следующее поколение вакцин от коронавируса!»

Это был лишь первый из нескольких тестов, которые должна была пройти вакцина. Исследователям еще предстояло доказать, что вакцина сможет защитить и от живого вируса мышей, обезьян и, наконец, людей. Последний этап тестирования наночастиц запустили в начале 2021 г. Но в тот момент в апреле были успешно продемонстрированы возможности белкового дизайна, это означало появление технологии, о которой раньше и не помышляли. Мы научились лепить живую материю, из которой мы все созданы.

Какой бы радикальной ни была генетическая революция последних десятилетий, белки по-прежнему оставались загадкой. Ген представляет собой просто зашифрованную информацию об отдельном белке. В гене набор из трех нуклеотидов ДНК, обозначаемых буквами, кодирует одну аминокислоту, а другой триплет кодирует другую аминокислоту. Существуют 20 аминокислот, которые клетка может использовать в качестве блоков для строительства белка, и каждая аминокислота имеет уникальную форму и функцию. Некоторые более гибкие, чем другие. Одни несут положительный заряд, а другие — отрицательный. Некоторые притягиваются к воде, а другие отталкиваются.

Весь день напролет наши клетки синтезируют новые белки с точным порядком аминокислот, прописанным в наших генах, и белки спонтанно сворачиваются в нужную форму. От этой формы и от заряда атомов на открытых участках зависит функция белков: на какие сигналы они реагируют, к чему прикрепляются, что могут делать. Когда мы говорим: «У него есть ген рыжих волос», это значит, что у него есть информация для синтеза белков, которые обеспечивают образование определенного пигмента. Когда мы говорим: «У нее есть ген, вызывающий рак молочной железы», это значит, что у нее есть мутация в гене, из-за которой образуется белок с неправильной аминокислотой, он работает некорректно, а это может привести к раку.

Понимание механизма сворачивания белков позволило бы нам разработать новый тип лекарств, которые могли бы связываться с вышедшими из строя белками или заменять их, а также помогло бы разобраться в причинах таких заболеваний, как болезни Альцгеймера, Паркинсона, Гентингтона и муковисцидоз, которые возникают из-за деформированных белков.

К сожалению, белки настолько малы, что даже с помощью мощных микроскопов невозможно понять, что происходит в этом наном мире. Мы не знаем точно, как белки должны складываться правильно, не говоря уж о том, что происходит не так, когда они сворачиваются неверно. Для получения на специальном оборудовании изображения одного белка с высоким разрешением могут понадобиться год работы и \$120 тыс. Сейчас мы знаем структуру всего 0,1% из них. В остальных случаях мы строим предположения. Это остается загадкой, несмотря на достижения генетической революции. Определенные генетические последовательности влияют на физические и психические проявления, но зачастую мы не знаем почему. Нам не хватало Розеттского камня для структуры белка, чтобы перевести то, что происходит на пути от считывания генетической последовательности до реализации функций организма.

Теоретически должна быть возможность предсказать итоговую структуру белка по кодирующему его гену, и научиться этому столь важно, что в 2005 г. журнал *Science* включил эту задачу в список главных нерешенных научных вопросов, составленный по случаю 125-летия издания. Но на самом деле раньше это было возможно лишь для немногих простых белков. Например, ученые знают, что если им нужно получить альфа-спираль (часто встречающуюся в белках спиралеобразную структуру, обеспечивающую стабильность), то они могут использовать такие аминокислоты, как лейцин, аланин и глутамат, которые имеют подходящие форму и заряд, позволяющие образовывать правильные спирали и плотно связываться с аминокислотами, расположенными витком выше и витком ниже. Если ученым нужно изогнуть спираль, они могут добавить пролин, который не формирует соответствующую связь и позволяет остальной части спирали отклониться в сторону.

Специалисты по структурной биологии, такие как основатель Института белкового дизайна Дэвид Бейкер (David Baker), смогли найти некоторые из этих базовых правил. Исследователи под руководством Бейкера внесли их в компьютерную программу *Rosetta*, которая

предсказывает структуры, и с ее помощью создали несколько небольших белков, в основном длиной в несколько десятков аминокислот. Некоторые из их достижений имеют большой потенциал: микроскопические «нанооболочки» можно использовать для упаковки и транспортировки лекарств по организму, а расположенные на них молекулярные детекторы срабатывают при встрече с раковой клеткой, имеющей на поверхности определенный набор аминокислот.

Однако наиболее важные белки в живых организмах имеют намного больший размер и состоят из тысяч аминокислот, каждая из которых взаимодействует с дюжиной соседей. Некоторые из них образуют связи, прочные, как в алмазе, некоторые наоборот оттачивают других. Подобные взаимодействия меняются в зависимости от расстояния. Таким образом, количество взаимодействий быстро становится астрономическим и расчеты для определения конечных структур долгое время оставались не под силу даже нашим лучшим умам и суперкомпьютерам.

В 1994 г. группа специалистов по вычислительной биологии, раздосадованная сложностью проблемы, решила, что небольшое дружеское соревнование может способствовать некоторому прогрессу. Под руководством Джона Моулта (John Moult) из Мэрилендского университета они запустили конкурс критической оценки прогнозирования структуры белка. Моулт знал подробные характеристики белков, структура которых была недавно определена, но не опубликована. Он рассылал генетическую последовательность для этих белков различным группам из разных исследовательских лабораторий, которые затем предлагали свои идеи о том, как должен выглядеть итоговый белок. Далее оценивали сходство прогнозов с реальной структурой, подсчитывая процент молекул на правильных местах. Правильная базовая структура оценивалась в 50 баллов; если были верно определены углы и связи между основными частями, можно было получить 70; а крошечные молекулярные нити, торчащие из белков, подобно волоскам, могли лишним 90 с лишним баллов.

С тех пор Моулт проводит конкурс каждые два года. Долгое время даже лучшие команды лишь строили догадки. В 2012 г., когда под руководством Бейкера был основан Институт белкового дизайна, команды набирали на конкурсе в среднем 20 баллов, и в течение десятилетия не наблюдалось никакой положительной динамики. «Были моменты, когда, подведя итог конкурса и увидев результаты, я отчаивался, — говорит Моулт. — Я думал: все это баловство,

зачем мы вообще этим занимаемся?» На 11-й раз появились некоторые новые идеи и лучшие результаты в среднем были около 30 баллов, на 12-м конкурсе опять произошел небольшой скачок — примерно до 40 баллов.

Затем, в 2018 г., был 13-й конкурс. Лучшие команды из института Бейкера опять улучшили результат, в среднем почти до 50, но их опередил неожиданный участник: принадлежащая Google компания *DeepMind*, чья система искусственного интеллекта в 2017 г. победила лучшего в мире игрока в го. За каждый белок искусственный интеллект набирал в среднем 57 баллов.

Такой результат потряс мировые лаборатории белковой инженерии, но оказалось, что это была всего лишь генеральная репетиция перед 2020 г. В тот год система *DeepMind* дала точный ответ. «Я подумал: это не может быть правдой, давайте подождем ответов по следующим белкам, — говорит Моулт. — И они продолжали приходить».

В среднем за все белки *DeepMind* набрала 92 балла. В более простых случаях она расположила правильно каждый атом. Но самые впечатляющие результаты были получены для некоторых чрезвычайно сложных белков, которые буквально загнали в тупик большинство команд. За одну молекулу никто не набрал больше 20 с небольшим баллов, а *DeepMind* получила больше 80.

Моулт был ошеломлен результатами. «Я занимался этим большую часть своей карьеры, — говорит он. — Я никогда не думал, что нам удастся достичь такой точности на уровне атомов». По его словам, самое поразительное — что система *DeepMind*, по-видимому, усвоила ранее неизвестные правила. «Это не просто распознавание образов. Каким-то невероятным способом машина "понимает" физику и может рассчитать, как будут располагаться атомы в уникальной последовательности аминокислот».

«Это было шокирующе, — соглашается специалист по структурной биологии и участник конкурса Мохаммед Алькурайши (Mohammed AlQuraishi) из Колумбийского университета. — Никогда бы в жизни не подумал, что увиджу столь стремительный научный прогресс». Алькурайши предполагает, что такой прорыв изменит биологические науки.

Ожидается, что позже в этом году команда *DeepMind* опубликует статью о своих методах и подробно расскажет, как они работали. Но некоторые аспекты могут остаться непостижимыми, поскольку ИИ улавливает слабые связи, которые не поддаются простому описанию в виде правил, и на данный момент ученых есть лишь общие представления, как это работает.

Для того чтобы предсказать влияние аминокислот друг на друга, программисты применили метод, который называется «внимание», в последнее время он стал причиной резкого прогресса в точности языковых переводов с помощью ИИ. Подобно белкам, язык — это кажущаяся линейной цепочка информации, которая сворачивается, образуя смысл. Слова вроде «это» могут иметь значение слова, использованного в совершенно другом предложении. Когда мы общаемся, мы постоянно перемещаемся вперед и назад по линейной цепочке, обращая внимание на определенные группы слов, чтобы понять, что в этом контексте означает другое слово. Как только мы определяем значение, то можем перейти к следующей группе слов, чтобы понять предыдущее в свете новой информации.

Анализируя структуру белка, *DeepMind* делает что-то похожее, сосредоточивая внимание на одной группе расположенных по соседству аминокислот и пытаясь понять их влияние друг на друга. Например, по-видимому, некоторые пары аминокислот в процессе эволюции оставались вместе, что указывает на наличие связи между ними и ограничивает их возможное положение в белке. Система *DeepMind* использует данную информацию, переходя к другой части белка и анализируя новый участок в свете того, что знает о предыдущем. Она многократно возвращается ко всем участкам белковой цепочки и в итоге на основе этой информации строит трехмерное облако из отдельных элементов, в котором отражены отношения всех атомов всех аминокислот. В сущности, ИИ рассматривает сворачивание белка как новый, чужой язык, который надо расшифровать.

Алькурайши говорит, что по мере того как другие лаборатории внедряют методы *DeepMind* и высококачественное прогнозирование строения белка становится повсеместным, длительность периода проб и ошибок, предшествующего получению белка нужной формы, оказывается гораздо короче. «Это делает белковый дизайн намного более эффективным», — говорит Алькурайши.

Однако команда *DeepMind* не занимается прикладной наукой, поэтому их искусственный интеллект не будет тратить время на разработку сложных чертежей для нужного белка. Его большой вклад будет косвенным. «Их работа показывает возможности белков и перспективы создания новых белков в будущем, — говорит биохимик из Калифорнийского технологического института Фрэнсис Арнольд (Frances Arnold), получившая Нобелевскую премию по химии в 2018 г. за улучшение

свойств природных белков с помощью метода направленной эволюции. — Но они не решили проблему проектирования и разработки белков для пользы людям».

Работа ляжет на плечи специалистов всего мира, пытающихся использовать технологии *DeepMind*, чтобы расширить возможности создания белков в своих лабораториях. «Это большой прорыв, — говорит Бейкер, команда которой вновь заняла второе место на конкурсе. — Я думаю, это позволит значительно улучшить то, что уже хорошо работает».

Прямо сейчас перед людьми стоит огромная проблема, которая, по выражению Арнольд, разрушает мир. Это проблема — COVID-19. Когда она возникла, Бейкер и другие сотрудники его лаборатории занялись поиском решения среди белков. Они внесли генетическую последовательность коронавируса в их компьютерную программу *Rosetta*, предсказывающую структуру белка, чтобы получить трехмерную модель, а затем изучили ее в поисках слабых мест, подобно пилотам повстанцев, планирующим нападение на «Звезду смерти». Как и Уоллс, они нацелились на *RBD* шипа. Но вместо того чтобы делать вакцину, запускающую выработку антител, Бейкер хотел сделать улучшенное антитело. Ему нужен был белок, единственной целью которого было бы цепляться к *RBD*, как микроскопическая липучка.

Однако антитела не идеальны. Организм не может заранее спроектировать антитело для патогена, которого он никогда не видел. Когда появляется новый захватчик, клетки иммунной системы создают множество копий тех антител, которые связываются с ним лучше всего, но они не обязательно присоединяются достаточно хорошо, чтобы остановить патоген. Кроме того, естественные антитела — относительно крупные белки, которые не всегда могут прицепиться к вирусному *RBD*.

Можно использовать «мини-связыватели», как их называет Бейкер. Это мелкие искусственные белки, в которых аминокислоты расположены так, чтобы они точно подходили к вирусному *RBD*. Без посторонних фрагментов они связываются более плотно. И они достаточно мелкие и легкие, чтобы их можно было впрыскивать через нос, а не колоть в руку. Никаких иголок!

Бейкер мечтал создать не вакцину, а лекарство: назальный спрей, который можно было бы использовать при первых признаках инфекции или заранее в качестве ежедневной профилактики, чтобы заполнить нос аэрозолем из мини-связывателей, которые покрыли

бы *RBD* вирусных частиц прежде, чем им удастся к чему-нибудь прикрепиться. У лекарства был бы длительный срок годности, как у пакета сушеной чечевицы, и его можно было бы быстро переделать для нового патогена и оперативно передать в руки медицинским работникам, учителям и всем тем, кто находится на передовой, — получилась бы своего рода созданная человеком иммунная система для всей цивилизации.

Для того чтобы разработать такие мини-связыватели, Лунсин Цао (Longxing Cao), сотрудник лаборатории Бейкера, возглавивший проект, исследовал структуру вирусного *RBD*, сопоставив его с набором крошечных белков, ранее созданных институтом, в поисках наиболее подходящей формы. Подобно скалолазу на сложном склоне, мини-связыватели должны быть достаточно малы, чтобы протиснуться в ущелье, где расположен *RBD*, и иметь такое строение, чтобы уцепиться «руками и но-

Вакцина, простая в производстве, защищающая от мутантных вирусов, которые еще только появятся, может стать именно тем решением, которое нужно миру

гами» в нужных местах. Цао отметил, где аминокислоты *RBD* образовывали участки с положительными зарядами, с отрицательными зарядами и гидрофобные (водоотталкивающие), а затем подогнал мини-связыватели так, чтобы у них было как можно больше подходящих участков. Он проверил миллионы возможностей с помощью программы *Rosetta*.

Лучшие конструкции состояли из трех спиралей, соединенных короткими нитями аминокислот, так что структура напоминала связку сосисок. Каждый мини-связыватель состоял примерно из 60 аминокислот, это более чем в десять раз меньше размера антитела и в 20 раз меньше размера белка шипа коронавируса.

Затем, конечно, Цао должен был перенести свой белок из программы в реальный мир. Процесс оказался на удивление легким. ДНК, состоящая из нуклеотидов А, Т, G и С, может быть без особых затрат создана на устройствах, похожих на струйные принтеры. Цао напечатал нити ДНК с последовательностью для своего мини-связывателя и ввел их

в дрожжи, которые, как программируемый домашний скот, выработали эти мелкие белки наряду со своими собственными. Затем он собрал белки и проверил их.

Лучший мини-связыватель прикреплялся к вирусу в шесть раз эффективнее, чем самые хорошие антитела, прочнее, чем любая другая молекула на планете, фактически образуя десятки крепких связей с *RBD*. Он был чрезвычайно стабилен и легко наносился в виде спрея. Хомячки, получившие дозу, становились невосприимчивыми к *COVID-19*. «Несомненно, я был взволнован, — говорит Цао. — Но не очень удивлен». Исследователи ожидают, что клинические испытания мини-связывателей начнутся уже в 2021 г., и ряд лабораторий по всему миру сейчас изучают, какими еще способами маленькие белки могут помогать организму или бороться с заболеваниями.

Несмотря на то что эти технологии внушают огромный оптимизм, некоторые специалисты в области биологической безопасности обеспокоены тем, что такие белки могут создаваться и для неблагоприятных целей. Например, прионы, вызывающие «коровье бешенство» и другие нейродегенеративные заболевания, — это неправильно свернутые белки, которые способствуют неправильному сворачиванию других белков, запуская смертоносную цепную реакцию, к тому же заразную, и они могут распространяться в виде аэрозоля. Конвенция о биологическом оружии, подписанная практически всеми странами, фактически запрещает разработку и использование биологического оружия на основе патогенов, но никому в голову не приходило распространить ее и на белки, которые никогда не были частью живого организма.

«Все это вызывает серьезную озабоченность, поскольку потенциальное биологическое оружие будущего — это не обязательно вызывающие заболевание патогены, — говорит эксперт по биологической безопасности Филиппа Ленцос (Filippa Lentzos) из Королевского колледжа Лондона. — Конвенция может распространяться на искусственные мелкие белки, а может и не распространяться, поэтому их юридический статус представляет собой важный вопрос».

Все же угроза от спроектированных мини-белков крайне маловероятна, говорит Ленцос, и не вызывает у нее серьезных опасений: «Если вы хотите причинить вред, то зачем вам применять что-то столь сложное и изощренное, как белковый дизайн? В природе есть множество более доступных вещей, которые можно использовать». Яды и патогены природного происхождения в уже готовом виде можно

встретить повсюду. Если действительно хочется навредить людям, имеются более простые пути.

В настоящий момент в создание полезных типов новейших белков вкладывается все больше научной энергии и знаний, и эти вещества могут вскоре попасть в больницу рядом с вами. Когда из почти 8 млрд людей в мире большинство ожидают вакцину от COVID-19, созданная Уоллс наночастица кажется многообещающим кандидатом.

После успешной нейтрализации псевдовируса в мышинных клетках следующей большой проверкой для вакцины стала встреча с реальным коронавирусом. Для этого Уоллс пришлось отправить своих мышей в лабораторию Ральфа Барика (Ralph Baric) в Университете Северной Каролины. Барик — один из ведущих в мире исследователей коронавируса. Его лаборатория имеет достаточный уровень биологической защиты, чтобы можно было работать с живым вирусом. Барик с коллегами наблюдали за многими вакцинами-кандидатами, поэтому в июне 2020 г. Уоллс была рада получить от них обнадеживающее электронное письмо: нейтрализующая способность вакцины из наночастиц зашкаливала — она была выше, чем у всех вакцин, которые они тестировали.

«Все сработало лучше, чем мы надеялись», — говорит Уоллс. Мыши хорошо пережили встречу с реальным вирусом. Они «полностью защищены, никаких признаков болезни». (Позже Уоллс обнаружила, что можно уменьшить и без того низкую дозу еще в девять раз, добавив бустер и получить такие же хорошие результаты.) В январе этого года началась ранняя фаза клинических испытаний вакцины в штате Вашингтон и в Южной Корее.

Однако пока шли испытания, появились новые варианты вируса, способные уклоняться от некоторых антител, образующихся при использовании вакцин первого поколения. Поэтому Уоллс занялась разработкой новой, улучшенной наночастицы. Вместо копий домена RBD SARS-CoV-2 в этой версии применялась мозаика из RBD четырех различных вирусов: SARS-CoV-2, SARS начала 2000-х гг. и еще двух других коронавирусов. Широкий спектр вариантов RBD вызывал формирование антител ко всем протестированным коронавирусам, в том числе к самому неуловимому варианту.

Вакцина, эффективная в крошечных дозах, простая и недорогая в производстве, не нуждающаяся в охлаждении и защищающая от множества мутантных вирусов, в том числе

от тех, которые способны появиться в будущем, может стать именно тем решением, которое нужно миру. Эти преимущества привлекли внимание крупных фигур в области производства вакцин, в том числе Раппуоли из GSK. «Нет никаких сомнений в том, что наша иммунная система интересуется наночастицами, — говорит он. — Это лучший вариант из имеющихся у нас». В недавнем комментарии в журнале *Cell* Раппуоли предсказал, что такие дизайнерские молекулы откроют новую эру в вакцинации: «Это дает безграничные возможности».

И варианты использования не ограничиваются вакцинами. В наш новый аминокислотный век способность продуманно проектировать наномашинны на уровне атомов может превратить борьбу с любым заболеванием в инженерную задачу. «Когда мы решаем проблему, связанные с каким-либо белком, нам надо иметь это в виду, — говорит Уоллс. — Нам необходимо присмотреться к белку и понять, что у нас есть инженерное решение. Каждый день приносит новые успехи в этой области».

Некоторые из этих успехов будут достигнуты в других областях — не в медицине, а, например, в науке о материалах. Так, Институт белкового дизайна изобрел белки, которые собираются в микроскопические сетки с ячейками, способствующие отложению минералов, и это новый способ производства эффективных сверхпроводников и батарей. Другой проект нацелен на создание белков, которые улавливают свет, как при фотосинтезе у растений, и преобразуют полученную энергию в электричество и топливо.

По мере роста возможностей в аминокислотном веке белки естественного происхождения, используемые нами сейчас для лечения, например инсулин для диабетиков, могут показаться столь же архаичными, как каменные орудия, которые применяли наши предки в каменном веке. Точно так же наши нынешние искусственно созданные белки, какими бы потрясающими они ни казались, — не более чем солнечные часы и колеса для телеги. Какой будет картина будущего, наполненного специально спроектированными молекулами, пока остается за пределами нашего понимания. Но, как и новые белки, черты будущего в итоге изящно свернутся в нужную форму. ■

Перевод: М.С. Багоцкая

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Бейкер Д. и др. Биофабрики будущего // ВМН, № 9, 2006.

БИОЛОГИЯ

ВЫВОДОК ПРИБЫЛ

Проведя 17 лет под землей, личинки Великого восточного выводка периодических цикад наконец-то выбираются на свет

Кейт Вонг

На протяжении всего минувшего мая в садах, огородах и лесах восточной части США разворачивалось одно из самых зрелищных действий в мире природы. Конечно, этому шоу не хватало эпической величавости, присущей далеким кочевкам антилоп гну по равнинам Серенгети, или безмятежной красоты, свойственной цветению сакуры в японских парках, но у истинных любителей природы это событие вызывало не менее благоговейный трепет. Речь идет о появлении на поверхности земли периодических цикад выводка X.

Каждые 17 лет миллиарды насекомых, образующих так называемый выводок X периодических цикад, выбираются из своих подземных убежищ, чтобы в последние дни своей жизни насладиться теплыми лучами солнца в компании сородичей. Жизнь цикад выводка X, выбравшихся на свет в мае этого года, зародилась еще в 2004 г., когда Facebook существовал только в стенах Гарвардского университета, а по телевидению транслировали

последние эпизоды сериала «Друзья». В то далекое время только что вылупившиеся из яиц нимфы (личинки) цикад, упав с деревьев на землю, тут же закапывались в почву. С тех пор они постоянно жили под землей, высасывая соки из корней трав и деревьев и медленно увеличиваясь в размерах. Все эти годы личинки (а на одном гектаре земли их численность могла достигать 3 млн экземпляров!) готовились к главным событиям своей жизни:



ОБ АВТОРАХ

Кейт Вонг (Kate Wong) — старший редактор раздела *Scientific American*, посвященного эволюции и экологии.



Чери Синнен (Cherie Sinnen) – иллюстратор-фрилансер, живет в Калифорнии.



выбраться на поверхность земли, превратиться здесь во взрослых насекомых, оглушительно прострекотать на деревьях свои любовные серенады, оставить после себя потомство и через несколько недель умереть.

У первых европейских поселенцев в Северной Америке внезапное появление полчищ этих насекомых невольно ассоциировалось с библейскими нашествиями саранчи. Но саранча — насекомые, относящиеся к отряду прямокрылых; иногда они образуют огромные стаи, которые совершают далекие миграции и уничтожают на своем пути любую растительность. Цикады же относятся к отряду

полужесткокрылых, то есть состоят в родстве с клопами. Летают они неважно и не образуют мигрирующих стай; дальность их перемещений обычно не превышает нескольких сотен метров. Кроме того, цикады не представляют опасности для растений: с помощью хоботка они высасывают соки из деревьев и кустарников, но растениям особого вреда это не причиняет.

На свете существуют около 3,4 тыс. видов цикад. Но периодические цикады, массовое появление которых отмечается лишь раз в 17 или 13 лет, встречаются только в восточной части США: 17-летние цикады обитают

Примерно через шестьдесят недель после откладки яиц из них вылупляются крошечные личинки (нимфы). Упав с деревьев на землю, они тут же закапываются в почву.

Вначале личинки питаются соками нежных корешков трав, а повзрослев, уходят на глубину 20–30 см и принимают высасывать соки из корней деревьев.

Долгое развитие

Развитие от яйца до взрослой половозрелой особи занимает у периодических цикад гораздо больше времени, чем у любых других насекомых. Большую часть своей жизни они проводят в земле в виде личинок (нимф). Здесь они кормятся и растут, а затем, достигнув строго определенного возраста, дружно выбираваются на поверхность земли. Синхронное появление огромных полчищ насекомых способствует выживанию вида: даже после того как цикадами досыта наедятся хищники, в живых остается масса их сородичей, способных оставить после себя многочисленное потомство. Как показывают исследования, цикады ориентируются во времени, отслеживая сезонные колебания доступности древесных соков, составляющих основу их рациона. Но как они ведут счет годам, проведенным в земле, и что заставляет их ровно через 17 лет выбираваться на поверхность? На эти вопросы ученые пока не могут ответить.

В мае, всего за несколько месяцев до достижения 17-летия, нимфы выходят на поверхность земли. В первые дни на свет выбиравается больше самцов, чем самок, а через пять-шесть дней — больше самок, чем самцов.

На 17-м году жизни, в апреле, личинки ползут в почве вверх; когда до поверхности земли остается 12–15 см, они некоторое время остаются неподвижными.



Вылупляющиеся в июле-августе нимфы начинают жизнь в виде бледных, похожих на муравьев «букашек» длиной всего 2–3 мм.



Личинки несколько раз линяют, приобретая все большее сходство с взрослыми насекомыми. На 12–13-м году жизни они линяют последний раз и достигают пятой (окончательной) нимфальной стадии развития.



Когда через пять-шесть дней экзоскелет полностью отвердевает, самцы начинают громко петь.

Примерно через час после появления на поверхности земли цикада выползает из нимфальной шкурки и превращается во взрослую особь. Поначалу такие насекомые имеют беловатую окраску, но по мере отвердевания экзоскелета их тельца быстро темнеют. Старые пустые шкурки остаются на коре деревьев или падают на землю.

Выбравшихся из земли сочных цикад с удовольствием едят самые разные животные — от птиц и рыб до пауков и домашних кошек. Поскольку самцы появляются на свет раньше самок, именно они и становятся основными жертвами голодных хищников. Такая «жертвенность» самцов способствует выживанию большего количества самок и их потомства.

Самцы цикад залетают в кроны деревьев и принимают дружно стрекотать, чтобы привлечь самок. Насекомые начинают спариваться.

После спаривания самка делает несколько разрезов в коре молодых побегов дерева и откладывает в них несколько сотен яиц.

Выбравшись на поверхность земли, цикада сбрасывает личиночную шкурку, но ее новые наружные покровы (экзоскелет) полностью затвердеют только через несколько дней.

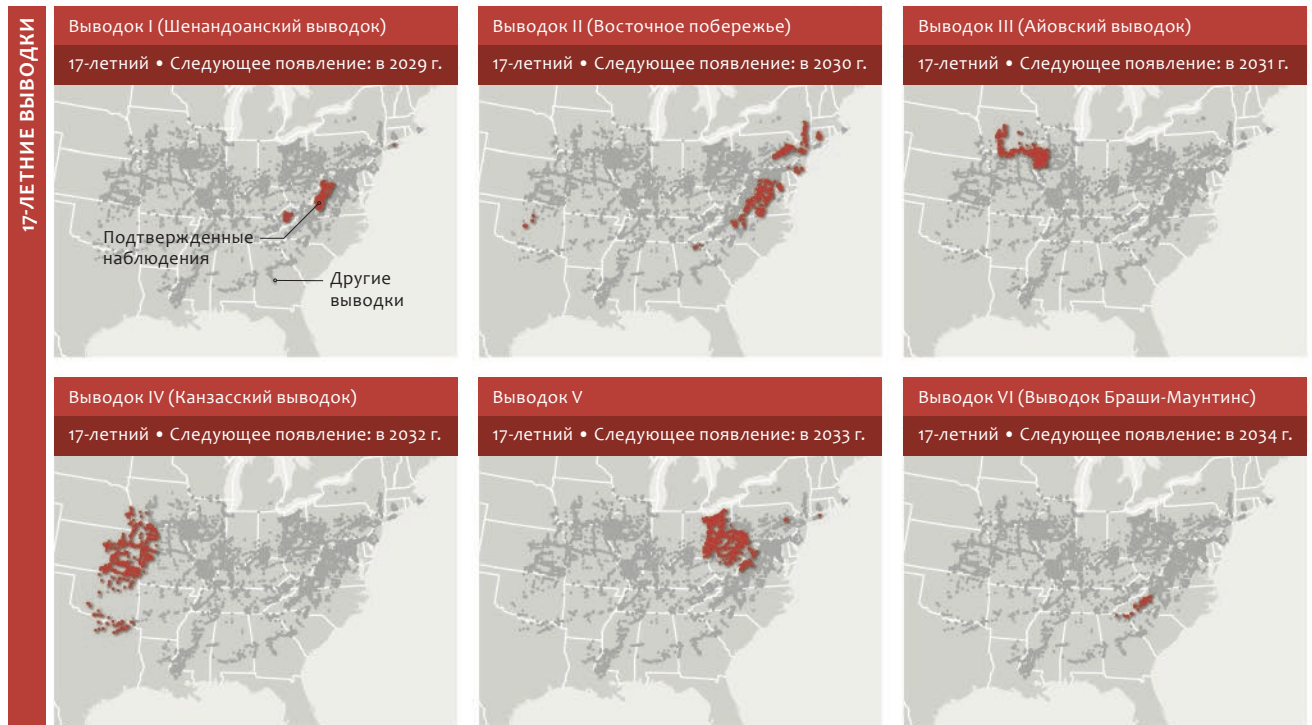
На поверхности земли взрослые цикады живут около двух-четырех недель. Тельца умерших насекомых падают с деревьев на землю и в конце концов разлагаются.



Выводки и виды

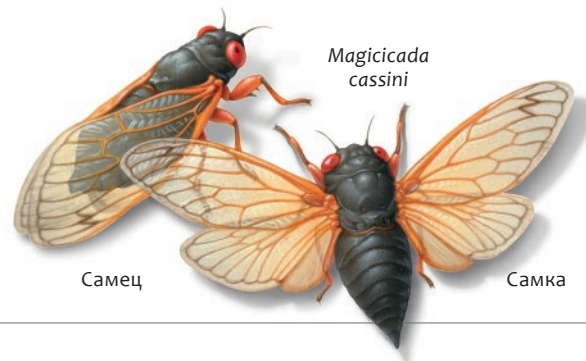
Периодические цикады, появляющиеся на поверхности земли каждые 13 и 17 лет, обитают только в восточной части США. Существуют три вида 17-летних цикад и четыре вида 13-летних цикад. Выводком называют всю совокупность цикад, обладающих одинаковым жизненным циклом, живущих в одном и том же регионе и появляющихся на поверхности земли в один и тот же год. Существуют 12 выводков 17-летних цикад и три выводка 13-летних цикад. Каждый выводок обозначается римской цифрой. Ученые

предполагают, что формирование выводков было обусловлено изменениями климата на протяжении последних 20 тыс. лет вкупе со способностью периодических цикад сдвигать свой жизненный цикл во времени, для того чтобы появляться на поверхности земли на четыре года раньше (при благоприятных условиях развития) или на четыре года позже (в суровых условиях), чем обычно. Области распространения этих выводков складываются в целостную картину, как кусочки пазла.



Состав выводка X

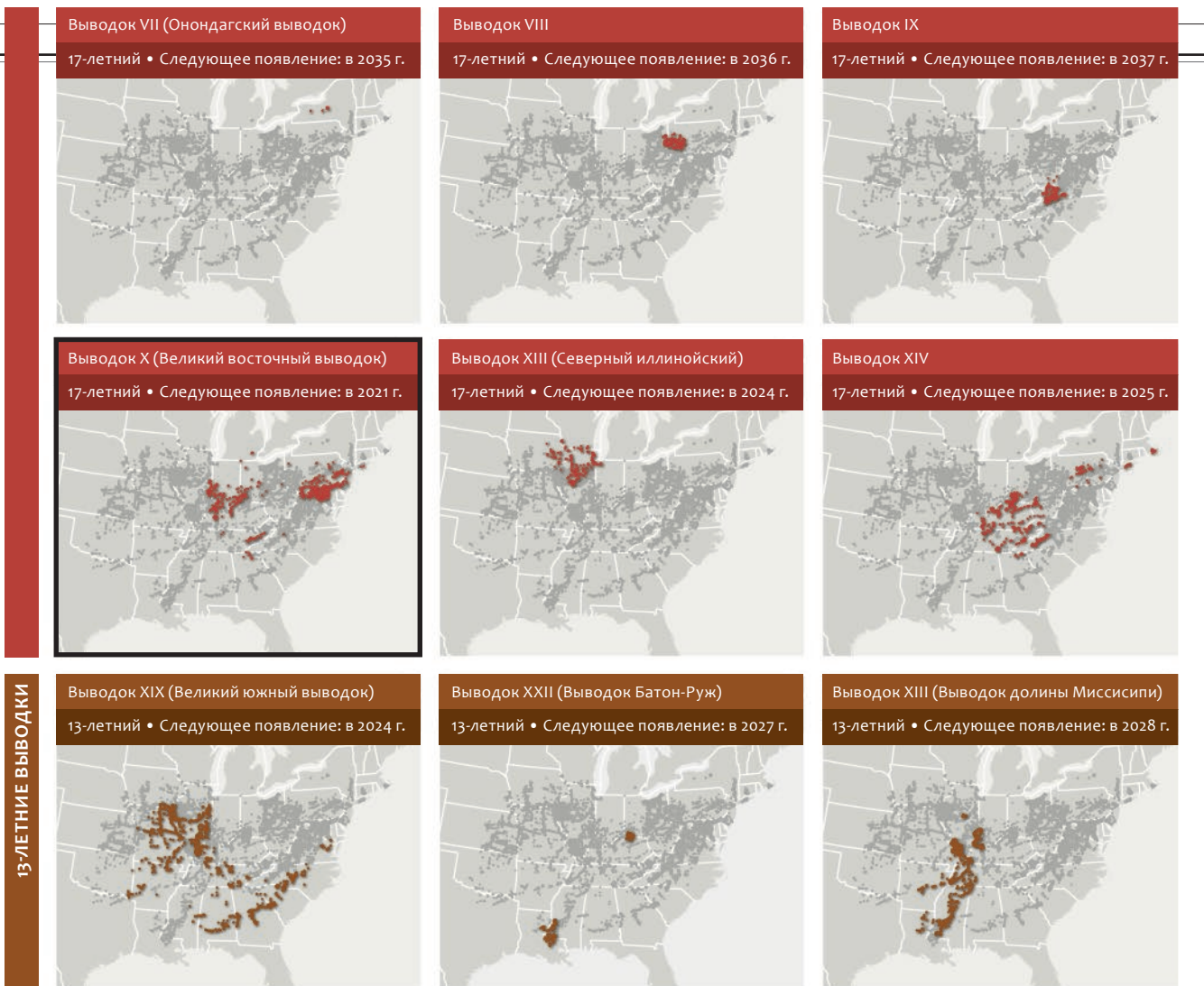
Представители всех трех видов 17-летних цикад — *Magicicada cassini*, *Magicicada septendecula* и *Magicicada septendecim* — обладают большим внешним сходством: у них красные глаза, черное тельце и оранжевые жилки крыльев. Но они немного различаются размерами и формой тела, окраской и характером песни. Так, например, для *M. septendecim* характерны крупные размеры тела, для *M. septendecula* — тонкие оранжевые полосы на нижней стороне брюшка, а для *M. cassini* — наличие в песне особых щелкающих звуков, за которыми следует пронзительное жужжание. У каждого вида 17-летних цикад имеется по меньшей мере один 13-летний «двойник», обладающий с ними большим внешним и поведенческим сходством (эти виды здесь не показаны).



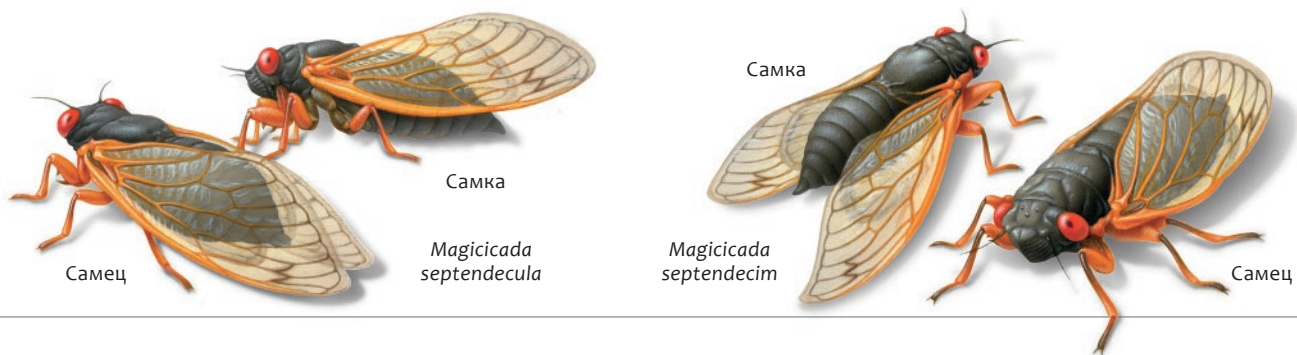
на севере этого региона, а 13-летние — на юге и в долине Миссисипи. Три вида 17-летних цикад — *Magicicada septendecim*, *M. cassini* и *M. septendecula* — производят на свет смешанные выводки, появляющиеся на поверхности земли со строгой периодичностью. Выводки обозначаются римскими цифрами. Выводок X — самый многочисленный из 12 существующих выводков 17-летних цикад, появляющихся в разные годы.

Строгая периодичность жизненных циклов этих насекомых, их значительная длительность,

а также синхронность появления цикад на поверхности земли издавна вызывают огромный интерес у биологов. «Длительность жизненных циклов большинства других изученных до сих пор видов цикад составляет от трех до пяти лет», — говорит Крис Саймон (Chris Simon) из Коннектикутского университета. Их нимфы (личинки) растут с разной скоростью в зависимости от генетических и средовых факторов и выбираются из земли, как только их тело достигает определенных размеров и уровня развития. В результате потомки



13-ЛЕТНИЕ ВЫВОДКИ



какой-либо одной самки могут превратиться во взрослых цикад в разные годы, поясняет исследовательница. Напротив, периодические цикады остаются под землей в течение строго определенного времени, независимо от сроков достижения ими окончательных размеров, а затем одновременно выползают из земли на поверхность.

Но как периодическим цикадам удалось выработать такие необычные паттерны развития? Сегодня данный вопрос активно изучается биологами. Анализ ДНК позволяет представить

приблизительную хронологию эволюции этих насекомых. Последний общий предок всех ныне существующих видов периодических цикад (род *Magicicada*) дал начало двум линиям насекомых около 3,9 млн лет назад в эпоху плейстоцена. Спустя примерно 1,5 млн лет, в эпоху плейстоцена, одна из этих линий в свою очередь разделилась на три ветви, которые в конечном итоге и дали начало семи видам ныне существующих 13- и 17-летних цикад. Но вопрос о том, почему именно эти цикады «решили» придерживаться 13- и 17-летнего

«режимов» развития, остается без ответа и поныне. Согласно одной из гипотез, циклы развития, длительность которых (13 и 17 лет) соответствует простым числам, защищают цикад от хищников, снижая их шансы на синхронизацию собственных жизненных циклов, длительность которых обычно соответствует составным (четным) числам, с циклами развития цикад. Однако два других известных науке вида периодических цикад, один из которых обитает на островах Фиджи, а другой в Индии, появляются на поверхности земли с интервалами в восемь лет и четыре года соответственно.

Ученые предположили, что периодические цикады произошли от непериодических цикад, изменив график появления на свет, основанный на размерах тела, на график, основанный на возрастных характеристиках, и одновременно сильно растянув период развития. Возможно, такому сдвигу способствовало изменение климата. Периодические цикады чувствительны к температуре — она определяет продолжительность сезона роста. Похолодание климата в плейстоцене вполне могло замедлить развитие молодых насекомых, но наряду с этим и повысить вариабельность периода роста, что сделало сроки появления взрослых особей у предковых форм цикад еще более переменчивыми, чем прежде. Поскольку в результате уменьшилась численность (и плотность) взрослых цикад, одновременно появляющихся каждый год на поверхности земли, понизились и их шансы на спаривание. В таких условиях переход цикад к стратегии, предполагающей одновременное появление на поверхности после длительного подземного развития при достижении личинками определенного возраста, представляется вполне оправданным: она увеличивала плотность взрослых популяций цикад и, соответственно, повышала шансы насекомых на успешное размножение.

Кроме того, одновременное появление на поверхности громадными полчищами помогает цикадам противостоять хищным врагам. Даже после того как птицы, млекопитающие и рыбы досыта наедаются сочными, беззащитными насекомыми, на деревьях остается еще масса их уцелевших сородичей, способных оставить после себя многочисленное потомство.

Климатические изменения оказали значительное влияние и на пространственное (географическое) распределение выводков цикад. По мере того как 10–20 тыс. лет назад ледники в Северной Америке то продвигались на юг, то вновь отступали на север, площадь листопадных лесов, где обитали цикады, непрерывно колебалась. В соответствии с этими циклами похолодания и потепления климата эволюционировало и размножение цикад. Джин Крицки (Gene Kritsky) из Университета Маунт-Сент-Джозеф в Цинциннати, штат Огайо, в качестве примера рассматривает эволюцию

выводка X в западной части этого штата. 20 тыс. лет назад ледниковые щиты простирались вплоть до северной границы окрестностей современного Цинциннати. Поскольку земля была покрыта льдом, в западной части Огайо тогда не было ни лесов, ни цикад. Но примерно 14 тыс. лет назад ледяной щит отступил к северу. «В регионе появились леса, а следом за ними и периодические цикады», — поясняет Крицки. В Огайо имеются еще три выводка 17-летних цикад, и каждый из них занимает определенную область штата. «Пространственное распределение в Огайо 17-летних цикад соответствует физиографическим регионам, сформированным ледниковыми периодами», — заключает ученый.

Периодические цикады смогли адаптироваться к изменению климата отчасти благодаря тому, что продолжительность их жизненного цикла обладает изрядной пластичностью: эти насекомые способны ускорять или замедлять графики своего появления на поверхности земли с шагом в четыре года. Но такая гибкость отнюдь не гарантирует им выживания в долгосрочной перспективе. Выводок XI, например, исчез после 1954 г.; численность других идет на спад. По мнению Крицки, главную угрозу существованию насекомых составляет исчезновение естественной среды обитания. Министерство сельского хозяйства США предсказало гибель выводка X из-за вырубки лесов еще в 1919 г.

Картирование эпизодов появления периодических цикад помогает ученым оценить состояние их выводков. Биологи уже в течение нескольких десятилетий просят население сообщать им результаты собственных наблюдений; в прошлом для этого использовались почтовые открытки, позднее — телефон и электронная почта. В наши дни Крицки и его коллеги привлекают добровольцев к этой работе, разработав специальное приложение под названием *Cicada Safari*, позволяющее людям отправлять ученым фотографии и видеосъемки любых замеченных ими цикад, а также изучать карту появления выводка X в различных регионах в режиме реального времени. «В 1902 г. Министерство сельского хозяйства США создало подробную карту появления цикад, основанную на информации, содержащейся в почти 1 тыс. почтовых карточек, полученных этим ведомством от населения», — говорит Крицки. В текущем году с помощью приложения *Cicada Safari* «мы надеемся получить 50 тыс. фотографий насекомых». Поистине достойные проводы Великого восточного выводка цикад 2021 года. ■

Перевод: А.В. Щеглов

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ How Cicadas Make Their Noise. Henry C. Bennet-Clark; May 1998.

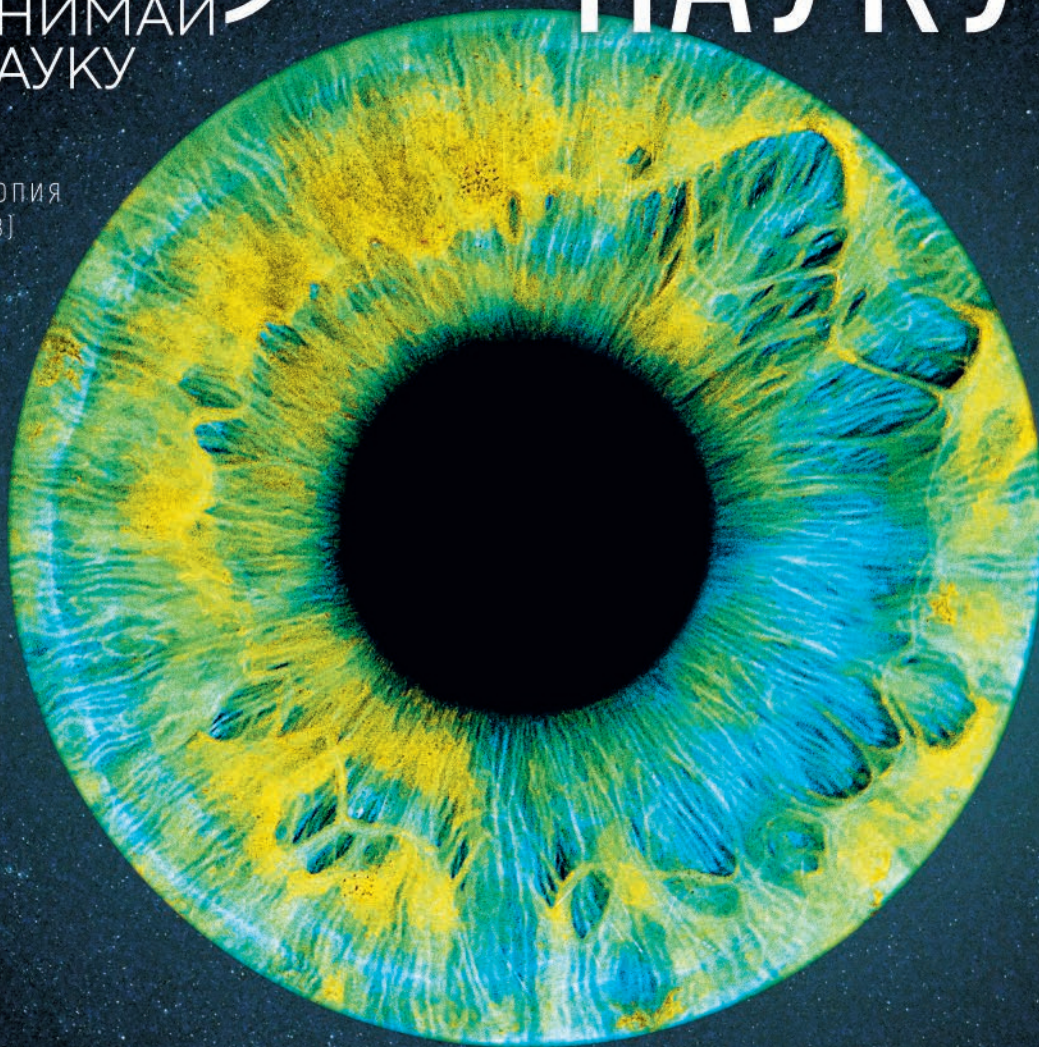


СНИМАЙ
НАУКУ

ФОТО И ВИДЕО КОНКУРС

СНИМАЙ НАУКУ

МИКРОСКОПИЯ
IRIS (ГЛАЗ)



ПОДРОБНОСТИ НА САЙТЕ NAUKATV.RU

- ПРИСЫЛАЙ ВИДЕОРАБОТЫ ДО 19 СЕНТЯБРЯ
- СПЕЦНОМИНАЦИЯ «КОСМОС»
- ВЫИГРЫВАЙ ЦЕННЫЕ ПРИЗЫ
- АВТОР САМОЙ УДАЧНОЙ ВИДЕОРАБОТЫ ПОЛУЧИТ ШАНС СТАТЬ ВЕДУЩИМ НА КАНАЛЕ

12+
реклама



ПОЗНАНИЕ



МОЯ ПЛАНЕТА
ТЕЛЕКАНАЛ



КАНАЛ
НАУКА



ЖИВАЯ ПЛАНЕТА
ТЕЛЕКАНАЛ



ИСТОРИЯ
ТЕЛЕКАНАЛ



ДОКТОР
ТЕЛЕКАНАЛ



ТЕЛЕКАНАЛ



Кристоф Кох (Christof Koch) — научный руководитель программы MindScope в Институте Аллена в Сизтле и фонда исследования сознания *Tiny Blue Dot* в Санта-Монике. Автор книги «Чувство самой жизни: почему сознание встречается повсеместно, но может быть вычислено» (*The Feeling of Life Itself: Why Consciousness Is Widespread but Can't be Computed*, 2019), член совета консультантов *Scientific American*.



НЕЙРОБИОЛОГИЯ

Электрический МОЗГ

Воздействуя на мозг с помощью электродов, можно выявить расположение осознанных переживаний

Кристоф Кох

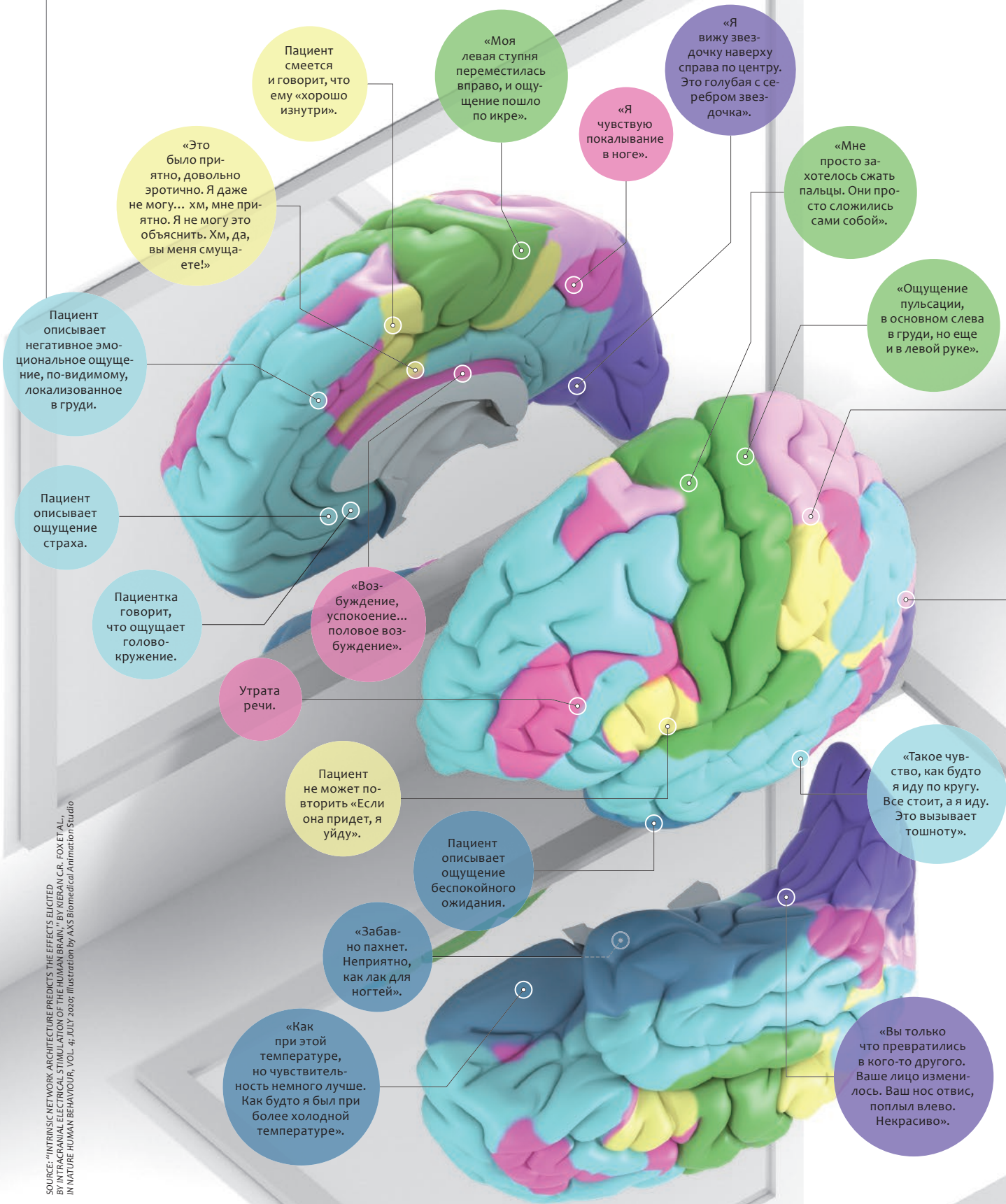
Рассмотрим следующие примеры.

- Вы направляетесь в сторону грозы, которая бушует в нескольких километрах от вас, и вам надо перебраться через холм. Вы спрашиваете себя: «Как я собираюсь его преодолеть?»
- Вы видите маленькие белые точки на черном фоне, как будто смотрите на звезды ночью.
- Вы смотрите сверху вниз на себя, лежащего в постели, но видите только свои ноги и нижнюю часть туловища.

Может показаться, что эти отдельные ситуации выбраны из огромной массы восприятий, ощущений, воспоминаний, мыслей и снов, которые

составляют наш ежедневный поток сознания. На самом деле каждое из этих переживаний было вызвано прямой стимуляцией мозга с помощью электрода. Американский поэт Уолт Уитмен верно уловил это в стихотворении «О теле электрическом я пою». Такие истории иллюстрируют тесную связь между телом и оживляющей его душой. Мозг и сознание так же неразрывно связаны друг с другом, как две стороны одной медали.

В недавних клинических исследованиях были выявлены некоторые правила и закономерности сознательной деятельности, причем иногда результаты таких исследований оказывались



Где в мозге живут ощущения






В атласе, опубликованном прошлым летом, собраны отчеты людей с эпилепсией при стимуляции участков коры во время операции. То, что они чувствовали и воспринимали, зависело от того, какую область мозга стимулировали. Все 1537 участков у 67 пациентов, получившие электрическую стимуляцию, были соотнесены с цифровой моделью мозга, упрощенная версия которой изображена на рисунке. При стимуляции этих участков пациенты рассказывали о своих ощущениях.

«Я просто действительно не мог сильно двигать (пальцами); пропало движение. Чувствую некоторое напряжение руки, но большой палец не действует».

«Я чувствовал, что руки двигаются, но это было не так. Я ощущал движения из стороны в сторону, как будто парение в воздухе».

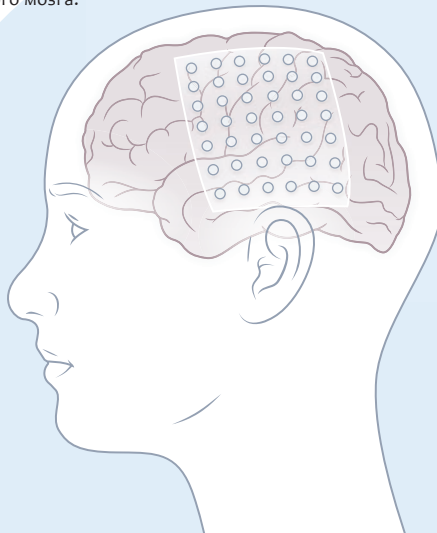
Цвета сознания

Стимуляция применялась к различным зонам и сетям мозга.

-  Соматомоторная
-  Зрительная
-  Дорсальная сеть внимания
-  Сеть салиентности
-  Лобно-теменная
-  Лимбическая
-  Сеть пассивного режима работы

Точки стимуляции

После вскрытия черепа исследователи поместили десятки электродов на поверхность коры головного мозга.



парадоксальными. Показано, что зоны мозга, участвующие в сознательном восприятии, имеют мало общего с мышлением, планированием и другими высшими когнитивными функциями. В настоящее время нейроинженеры работают над тем, чтобы создать на базе этих открытий технологии, позволяющие заменить утраченные когнитивные функции, чтобы в более отдаленном будущем улучшать сенсорные и когнитивные способности и память. Например, сейчас нейрокомпьютерный интерфейс позволяет слепым людям хоть как-то воспринимать свет. Однако при этом обнаруживаются дополнительные трудности, препятствующие полному восстановлению зрения и слуха. Они показывают, какие проблемы лежат на пути к научно-фантастическим усовершенствованиям, позволяющим получить доступ к мозгу как к компьютерному запоминающему устройству.

Животное электричество

Нервные системы работают за счет электрических сигналов, идущих по сетям, состоящим из множества связанных переключающих элементов. Эту тему изучали большое количество врачей и ученых. Первым был Луиджи Гальвани, который в конце XVIII в. присоединил к свежесрубленной лягушке металлическую проволоку. Направив провод в небо во время грозы, он заставил лягушачью лапку подергиваться при каждой вспышке молнии. В своих исследованиях Гальвани показал, что нервные волокна передают «животное электричество», которое ничем не отличается от «атмосферного электричества», обнаруженного Бенджамином Франклином в экспериментах с воздушным змеем в Филадельфии в 1752 г. В 1802 г. племянник Гальвани Джованни Альдини перед публикой провел электрическую стимуляцию открытого мозга казненного преступника. Дрогнула челюсть. Открылся глаз. Возможно, именно это зрелище вдохновило Мэри Шелли на написание классического готического романа «Франкенштейн».

В последующих исследованиях на животных было показано, что возбуждение определенных областей мозга вызывает движение определенных мышц или частей тела. Эти исследования привели к открытию моторной коры в 1870-х гг. В 1874 г. американский врач Роберт Бартолоу (Robert Bartholow) впервые провел

прямую стимуляцию мозга пациента, находящегося в сознании; это вызвало этические споры, потому что он причинил пациентке боль и, вероятно, ускорил ее смерть. В последующие десятилетия интракраниальная электростимуляция была усовершенствована. Она вошла в арсенал нейрохирургов благодаря прорывной работе Уайлдера Пенфилда (Wilder Penfield) из Монреальского неврологического института, который в 1930–1950 гг. использовал электростимуляцию, чтобы определить области коры головного мозга, отвечающие за сенсорные и моторные функции.

Некоторым людям с эпилепсией не удается снизить количество или тяжесть приступов с помощью лекарств. Тогда можно использовать нейрохирургические методы, но только если приступы возникают в ограниченном участке коры (самого внешнего слоя мозга, участвующего в восприятии, управлении движениями, отвечающего за речь, умозаключения и другие функции) либо в тесно связанных с корой

Пациенты сообщали о переживаниях, вызываемых стимуляцией, — например, в видении искаженных лиц, как на картинах Сальвадора Дали

структурах, таких как гиппокамп. Неконтролируемая гипервозбудимость возникает из-за нарушения связей в одном месте. Она может разрастаться и в итоге охватить остальную часть мозга. Возникает сложный вопрос: какой объем нервной ткани следует удалить? Если вырезать слишком мало, приступы могут возобновиться, если слишком много — пациент может потерять способность говорить, видеть или ходить. Хирурги не должны повредить функционально важные области коры, необходимые для повседневной деятельности, — первичную слуховую, зрительную, соматосенсорную и моторную кору и участки, отвечающие за речь и ее понимание.

Интракраниальная электростимуляция используется для поиска участков, которые необходимо сохранить. Нейрохирурги имплантируют дискообразные электроды под череп, под образованную соединительной тканью плотную мозговую оболочку, либо они могут вводить игольчатые электроды прямо в серое вещество, чтобы оценить его работу. После того как хирурги определили очаг эпилептической активности и убрали электроды, они проводят операцию по удалению этого участка — и припадки обычно прекращаются. Электростимуляцию

можно использовать и постоянно, в этом случае электроды все время находятся в нужном месте. Слабые импульсы, идущие от электродов, помогают справиться с тремором и ригидностью при болезни Паркинсона (метод называется «глубокая стимуляция») или уменьшить частоту и тяжесть припадков. Сейчас в предварительных клинических исследованиях оценивают использование таких имплантированных электродов в качестве зрительного протеза, помогающего ориентироваться людям с нарушением зрения, а также для лечения обсессивно-компульсивного расстройства и депрессии.

Горячо или холодно

В июле 2020 г. в журнале *Nature Human Behaviour* был опубликован атлас, показывающий участки коры головного мозга, которые при возбуждении электродами вызывали сознательные переживания, например восприятие грозы или отделения от тела, описанные выше. Под руководством профессора неврологии Медицинской школы Стэнфордского университета Джозефа Парвизи (Josef Parvizi) были собраны данные о 67 людях с эпилепсией. Исследователи стимулировали более чем 1,5 тыс. участков коры, преимущественно с помощью электродов, введенных под твердую мозговую оболочку. Они сопоставили активность этих участков с точками на цифровой модели мозга, чтобы можно было сравнивать данные, полученные от разных людей (рисунок борозд и извилин, придающий мозгу внешнее сходство с грецким орехом, отличается от человека к человеку). Ученые искали «вызывающие отзыв» электроды, которые запускали некоторые зрительные или тактильные ощущения, мышечные подергивания или нарушение речи. Если пациент при стимуляции ничего не ощущал, электрод считался «не вызывающим отзыв».

Пациенты сообщали о разных субъективных переживаниях, вызываемых стимуляцией: быстро вспыхивающие точки, похожие на звездочки; искаженные лица, как на картинах Сальвадора Дали; телесные ощущения, такие как покалывание, щекотание, жжение, пульсация и то, что называют чувством выхода из тела; страх, беспокойство, половое возбуждение, веселье; желание пошевелить конечностью; желание упорно бороться с какой-то большой, но не распознанной проблемой. Простого раздражения нервной ткани слабым электрическим воздействием было достаточно, чтобы вызвать эти ощущения. Во время мнимой стимуляции (без применения тока) пациенты ничего не чувствовали.

Несмотря на то что интракраниальная электростимуляция безопасна и эффективна, это

грубый метод. Низкоимпедансные электроды имеют площадь 6–10 мм² и позволяют подавать ток до 10 мА между соседними электродами, это изменяет возбудимость миллиона и более нервных клеток. Однако эффекты, вызванные такой стимуляцией, могут быть довольно локальными. Поперек борозды (желобка на поверхности коры) чувствительность может изменяться от «все» до «ничего» в пределах миллиметров.

Группа под руководством Парвизи обнаружила, что электроды в специализированных сенсорных и моторных областях со значительно большей вероятностью вызывали ответ, чем расположенные в зонах, обеспечивающих высшие когнитивные функции. От половины до двух третей электродов над зрительными и тактильными (соматосенсорными) зонами коры вызывали некоторые осознанные ощущения; в районах латеральной и переднемедиальной префронтальной коры, которые участвуют в высших мыслительных процессах, такую реакцию вызывал не более чем каждый пятый электрод. Иначе говоря, электроды над задними зонами коры, отвечающими за сенсорное восприятие, вызывали ответ с большей вероятностью, чем те, которые располагались спереди, над областями, важными для когнитивной деятельности, такой как размышления, планирование, моральные суждения, принятие решений и логические операции.

Несмотря на их важную роль в мышлении, эти области имеют мало отношения к сознанию. И действительно, в прошлом столетии нейрохирурги наблюдали, что при удалении больших участков префронтальной коры, если сохранены элоквиентные (связанные с речепорождением) зоны, ежедневный поток сознания у таких пациентов явным образом не нарушается. Неэлоквиентные области могут влиять на сознание, но в целом, по-видимому, сознательные ощущения возникают не там. Это привилегия задних областей — теменной, височной и затылочной долей. Почему физический носитель наших психических переживаний должен располагаться в задней части мозга, а не в передней, остается неясным.

Видеть или не видеть

Применение интракраниальной стимуляции зрительной коры вызывает зрительные ощущения, которые называются фосфенами: короткие вспышки, похожие на молнию в темноте. На этом основана давняя мечта о приборе, который поможет восстановить зрение слепым. Миллионы людей во всем мире живут со слепотой на оба глаза из-за пигментного ретинита, возрастной дегенерации желтого пятна, глаукомы, инфекции, рака или травмы.

Врачи, ученые и инженеры начали заниматься протезированием зрения в 1960-х гг., но только недавно смогли создать соответствующие технологии для помощи слепым людям. Один из ярких примеров — устройство *Orion*, разработанное компанией *Second Sight Medical Products* в Лос-Анджелесе. Крошечная камера, установленная на очках, превращает изображение в импульсы и передает их по беспроводной сети на 60 электродов, расположенных на зрительной коре. Люди, которым имплантировали в мозг такое экспериментальное устройство, воспринимают множество точек, что помогает им ориентироваться. «Это как взрыв каждый раз, когда я его включаю, — рассказывает один из участников исследования. — После того как я вообще ничего не видел, я внезапно вижу, как вокруг движутся маленькие вспышки света, и понимаю, что они что-то значат. Просто потрясающе снова иметь работающее зрение хоть в каком-то виде». *Orion* значительно улучшает качество жизни людей, раньше существовавших в полной темноте. Устройство позволяет им безопасно переходить улицу или определять положение дверного проема. Но с его помощью нельзя восстановить способность узнавать фигуры, формы или буквы.

Однако группа из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе и Медицинского колледжа Бейлора, возглавляемая нейрохирургом Дэниелом Йошором (Daniel Yoshor), сумела этого добиться, о чем сообщается в журнале *Cell*. Они стимулировали соседние участки зрительной коры, чтобы вызвать фосфены близко друг от друга, поскольку показано, что зрительное поле отображается на поверхности зрительной коры упорядоченным образом. Данное наблюдение привело к ошибочному убеждению, что отдельные фосфены подобны пикселям на компьютерном дисплее, то есть если вы одновременно простимулируете на поверхности коры серию точек в форме креста, то человек должен увидеть точки, образующие крест. Но этого не происходит.

Стимуляция более одного участка дает непредсказуемый результат. У одного испытуемого одновременная стимуляция пятью электродами, каждый из которых соответствовал одному отдельному фосфену, вызвала свечение двух больших фосфенов, которые не сливались в букву или какую-либо другую понятную форму. Однако если исследователь разносил активацию электродов во времени, участник мог узнавать формы. Отклонения во времени отражали задержку, необходимую, чтобы проследить форму буквы, как если бы исследователь писал букву на руке испытуемого или на листке бумаги. При таком более динамическом способе

незрячий участник с имплантом мог узнать буквы Z, N, V и W, быстро отличая движение вниз от движения вверх, поскольку при написании букв используются разные последовательности движений.

Видеть форму одной буквы — не совсем то же самое, что видеть великолепный закат над погомеровски виноцветным морем, но это уже прогресс. Почему одновременная стимуляция улучшает восприятие — неизвестно, и это показывает, как мало мы знаем о работе коры.

Что дальше

В области нейрокомпьютерных интерфейсов происходит стремительный прогресс. Компания Илона Маска *Neuralink* в апреле этого года представила впечатляющее видео, на котором обезьяна играет в компьютерную игру *Pong*, не пользуясь каким-либо джойстиком. Это было сделано с помощью двух небольших чипов, имплантированных в левую и правую моторную кору животного. В каждом чипе имеются 1024 волосковых электрода, воспринимающих сигналы от отдельных нейронов. В совокупности они передают намерение обезьяны быстро переместить ракетку вверх или вниз на экране, чтобы отбить мячик. Все было сделано по беспроводной связи, из обезьяны не торчало никакой электроники или свисающих проводов. Многие считают, что такие операции вскоре станут обычными и с помощью превосходных электронных деталей можно будет заменять или компенсировать поврежденные биологические части — неисправные глаза или уши, нарушенную память. В таких оптимистических рассуждениях игнорируется факт, что для всего этого требуется трепанация черепа. В целом для превращения научных открытий в реальные методы лечения нужны не годы, а десятилетия. Я вполне уверен, что такая модификация медицины не произойдет в течение моей жизни (сейчас мне 64 года).

Самые «легкие» препятствия, которые надо преодолеть на пути к такому утопическому (или антиутопическому) будущему, — технологические. Прибор должен надежно, быстро и аккуратно считывать электрические сигналы мозга и генерировать их. Устройство, созданное компанией *Neuralink*, — в настоящее время лучшее из всех имеющихся и, безусловно, будет улучшаться и дальше. Но нам еще предстоит пройти долгий путь, прежде чем мы сможем определить, какой из 50 тыс. или более нейронов в каждой частице мозгового вещества участвует в определенном восприятии или действии. И только когда это произойдет, можно будет подавать электрическую стимуляцию именно на нужные нейроны, не затрагивая отростки

соседних клеток. Тот факт, что Парвизи с коллегами более чем в половине случаев не удалось вызвать сознательное восприятие, означает, что у нас нет инструментов, позволяющих надежно вызвать хоть какое-то ощущение с помощью электрической стимуляции, не говоря уж о том, чтобы формировать какое-то определенное ощущение.

Хирургические и юридические препятствия еще сложнее. Нужно иметь возможность регулярно и безопасно имплантировать устройства, просверливая твердый череп, чтобы добраться до серого вещества под ним, с минимальным риском инфекций, кровотечений и судорог. Более того, электроника должна работать годами внутри теплой, влажной и соленой биологической ткани, а это не лучшие условия для работы. Не хотелось бы, чтобы устройство заржавело или зависло, выйдя из строя. Поэтому нейронные имплантаты останутся последним средством для случаев серьезных сенсорных или моторных нарушений. Когда нейропротезы пройдут клинические испытания, с их помощью слепые смогут видеть, а люди с серьезными физическими нарушениями — выполнять такие действия, как управление инвалидной коляской с помощью мыслей, подобно тому как обезьяна играет в *Pong*. Для всех остальных возможные преимущества явно не стоят тех проблем, которые связаны с высокоинвазивной операцией на головном мозге.

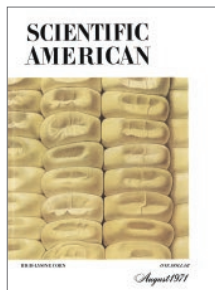
Но наша главная цель впереди — понять, как 1,5 кг возбудимой нервной ткани обеспечивают зрение, движение и страдание. Да, физический субстрат ада или рая заложен в биоэлектрических сигналах, которые подчиняются законам природы. Но это почти ничего не говорит нам о том, каким образом триллион электрических сигналов, возникающих ежесекундно и текущих по сетям из десятков миллиардов разных клеток, формируют зрение, звук или эмоцию.

Интракраниальная стимуляция мозга демонстрирует повседневное чудо превращения воды в вино, то есть работы мозга — в сознание. И все равно остается вопрос: что такого есть в мозге, этом самом сложном куске живой материи во Вселенной, что превращает активность 86 млрд нейронов в ощущение самой жизни? ■

Перевод: М.С. Багоцкая

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ *Awakening an Unconscious Mind*. William Skaggs; Scientific American Mind, July 2014.



АВГУСТ 1971

Биомеханика саранчи. Подобно самолету, насекомое может вращаться вокруг своей продольной оси, крениться вокруг горизонтальной и рыскать вокруг вертикальной. У саранчи есть два разных механизма коррекции рыскания: быстрое изменение крутки крыла, положение

живота и ног, которым управляют чувствительные к ветру волоски на ее голове, и более медленное и тонкое движение такого же характера, вызываемое рецепторами шеи. По всей видимости, сигналы об изменении направления ветра, указывающие на рыскание, объединяются где-то в центральной нервной системе саранчи, после чего следуют независимые команды моторным органам крыльев, ног, живота и головы.



АВГУСТ 1921

Вкусное радио. Два инженера недавно провели эксперименты, чтобы определить возможность приема радиосигналов при помощи чувства вкуса. Электроды помещали под язык, чтобы вызвать вкусовые ощущения при подключении к ним источника электрического напряжения.

Были проведены испытания с использованием постоянного и переменного тока частотой 60 циклов низкого напряжения для определения количества энергии и напряжения, необходимых для восприятия вкуса. Был опробован прием реальных сигналов с антенны. Оказалось, что это невозможно даже с четырьмя каскадами усиления. Результаты показывают, что хотя с электрической точки зрения радиосигналы можно принимать посредством чувства вкуса, оно намного уступает слуху и зрению.

Непрерывный апельсин. Круглогодично плодоносящее апельсиновое дерево, которому, по мнению производителей цитрусовых, суждено произвести революцию в выращивании апельсинов, было обнаружено садоводами в небольшой роще в Эйвон-Парке, штат Флорида. Чтобы защитить растение, вокруг него установили забор из толстой проволоки высотой 6 м и поставили круглосуточную охрану. Дерево плодоносило непрерывно восемь лет, но до недавнего времени о его существовании знали только владелец и несколько соседей, которые не осознавали его ценности и считали просто чудом природы. Для размножения этого дерева был сформирован синдикат, чтобы в 1923 г. в рощах можно было высадить большое количество его потомства.

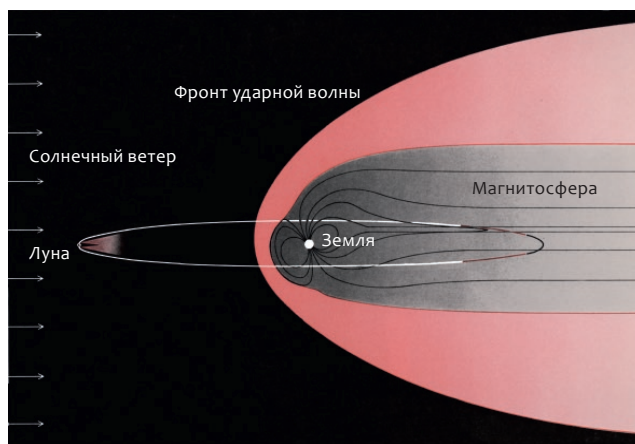


АВГУСТ 1871

Первый кожзаменитель. Техническая ткань находит широкое применение в качестве заменителя кожи. Важная область ее использования — покрытие верха экипажей, изготовление дорожных сумок и чемоданов, из нее шьют и водонепроницаемые куртки

и брюки. Ее основа — хлопчатобумажная ткань. Сначала на нее наносится покрытие из субстанции, в состав которой входят масло, сажа, смола и другие ингредиенты, сваренные до консистенции расплавленного дегтя. Затем ткань наматывается на огромную деревянную раму, которую помещают в обогреватель для просушивания. После этого ее укладывают на длинные столы, рабочие сбрызгивают ткань водой и трут пемзой, пока ее поверхность не станет идеально гладкой. Ткань покрывают лаком и снова пропускают через нагреватель. Теперь это кусок ткани с толстым блестящим черным покрытием, очень напоминающий лакированную кожу.

Чудеса хлороформа. Хлороформ — самый известный растворитель камфоры, смол, сургучей, гуттаперчи, растительных алкалоидов, он удаляет жирные пятна с тканей любого типа, но в основном используется как анестезирующее средство. Есть несколько других летучих органических веществ, обладающих аналогичными свойствами, но ни одно из них не вызывает полного отключения сознания и расслабления мышц, происходящих после вдыхания хлороформа. ■



«Солнечный ветер» сметает магнитное поле Земли, формируя магнитосферу (серый), что, в свою очередь, образует фронт ударной волны (красный). Когда Луна находится в магнитосфере, ее магнитная среда обусловлена земным магнетизмом. В свободном потоке солнечного ветра через магнитный слой Луны (более светлая область) проносится беспорядочный поток частиц солнечной плазмы, 1971 г.



МИКРОБИОЛОГИЯ

НАСТОЯЩИЕ ЖИВЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

После 100 млн лет, проведенных
в донном осадке, микроорганизмы
пробудились и стали
размножаться

Дженнифер Фрэзер

В 2010 г. ученые Интегрированной программы океанического бурения (*Integrated Ocean Drilling Program, IODP*) изучали район Южно-Тихоокеанского круговорота — огромную океанскую пустыню, более бесплодную и необитаемую, чем большинство песчаных пустынь. Вблизи центра этой системы течений находится Океанский полюс недоступности, знакомый фанатам Говарда Лавкрафта как дом покрытого щупальцами монстра Ктулху. Здесь же располагается Южно-Тихоокеанское мусорное пятно, аккумулирующее частицы микропластика. Ближайшее населенное место — Международная космическая станция, иногда пролетающая над этим регионом.

ОБ АВТОРАХ

Дженнифер Фрэйзер (Jennifer Frazer) — популяризатор науки, лауреат премии Американской ассоциации содействия развитию науки по научной журналистике, автор блога «Хитроумная амеба» (*The Artful Amoeba*) для *Scientific American*, дипломированный специалист по биологии, фитопатологии и научной журналистике.



Океанские течения образуют здесь гигантский водоворот, но в его центре вода спокойна и неподвижна. Сюда приносится мало питательных веществ, поэтому все живое едва сводит концы с концами. В этой районе за миллион лет выпадает от силы метр морского «снега» — останков, помета и пыли, приносящих энергию из богатых светом приповерхностных слоев в темные глубины. Это самое непродуктивное место во всем Мировом океане.

С буровой вышки команды *IODP*, высота которой составляла более 60 м, в эту толщу воды уходила труба длиной в несколько километров. Работу установки обеспечивали 12 доталкивателей — столько же, сколько в морях с сильным волнением. Как только труба достигала дна, бур погружался на 75 м вглубь глубоководной глины и известковых осадков, богатых микроскопическими окаменелостями.

К моменту подъема на поверхность внутри труб содержались длинные керны осадка, заключавшие в себе до 100 млн лет истории Земли. Команда задавалась вопросом, как долго могли микроорганизмы выжить в этой среде — почти пустом океанском холодильнике — и в каком они состоянии. Ожидалось, что в осадке будет мало микробных клеток: от 100 до 3 тыс. в 1 см³, что как минимум в десятки (а потенциально — в десятки миллионов) раз меньше, чем на такой же глубине в более продуктивных океанских экосистемах.

Но когда исследователи «покармлили» эти клетки в лаборатории, случилось неожиданное. 100 млн лет голода должны были превратить данные клетки в микробных «зомби» — живых, но неспособных расти или растущих настолько медленно, что скорость роста не поддавалась бы измерению. В начале 2000-х гг. несколько бактериальных клеток, находившихся в донном осадке до 35 млн лет, удалось заставить расти в культуре, но дизайн эксперимента не предполагал оценки скорости роста. В 2017 г. микроорганизмы, «возрожденные» из бескислородного каменноугольного пласта возрастом 12–16 млн лет, смогли расти, но крайне медленно. Их время удвоения находилось в диапазоне от нескольких месяцев до столетия — один из самых низких показателей за всю историю экспериментов.

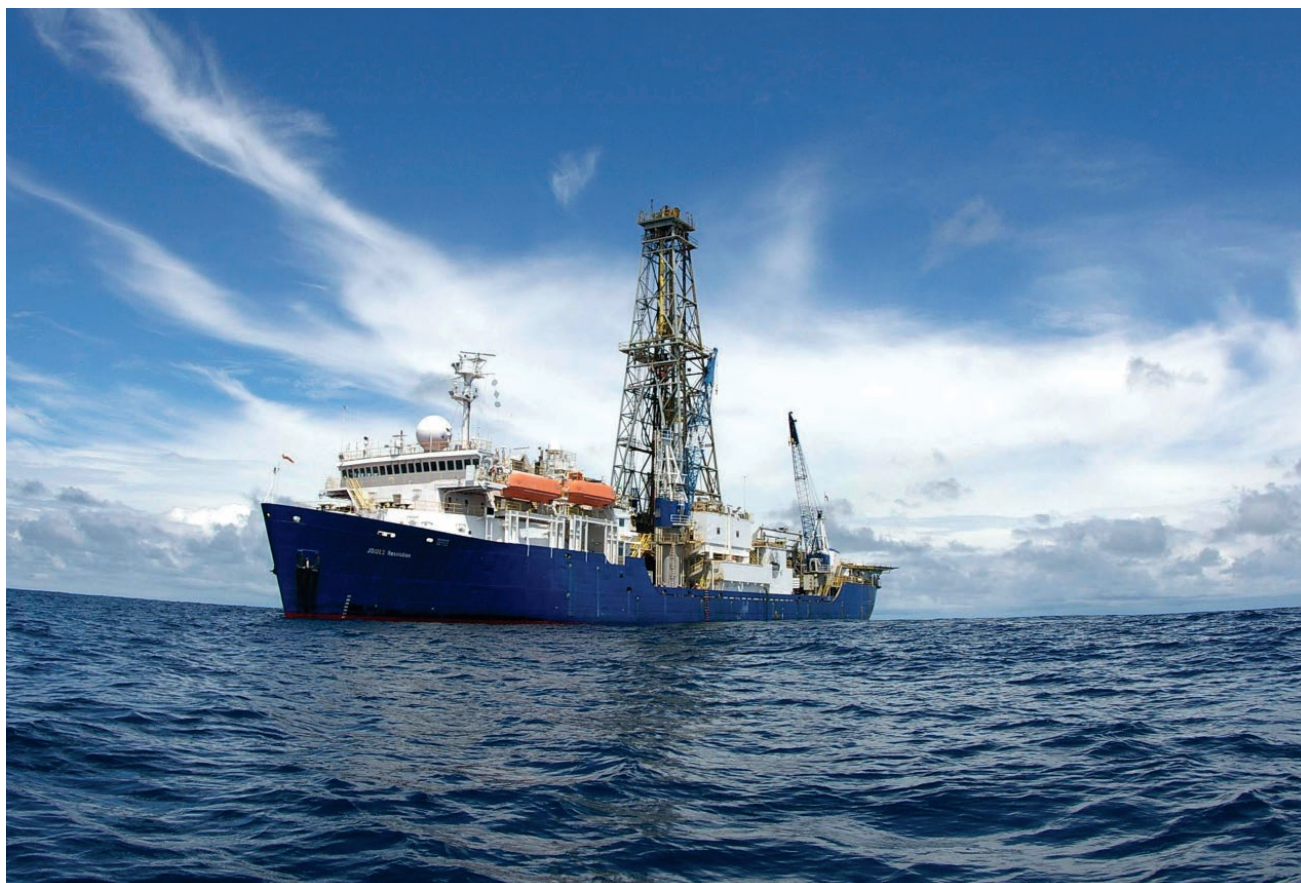
Но в этом исследовании, опубликованном в *Nature Communications* в июле 2020 г., 99% подкормленных микроорганизмов «проснулись», начали есть и принялись за дело. За 68 дней инкубации они размножились в 10 тыс. раз, удваивая свое количество каждые пять дней. В их потомках содержались меченые изотопы углерода и азота, которые они могли получить только вместе с пищей, предложенной исследователями.

Здесь стоит остановиться и подумать о значении таких результатов. 70% земной поверхности покрыто донными осадками, микробное население которых составляет половину всей микробной биомассы планеты. В данном эксперименте проснулись и стали размножаться клетки, которые могли осесть на дно, когда в океанах плавали плезиозавры. Прошло четыре геологических периода, но эти микробы, укрытые от космических лучей толстым одеялом из океана и донных осадков, выжили. После подъема на поверхность и легкого завтрака их жизнь продолжилась как ни в чем не бывало.

Даже если время с начала пандемии кажется нам вечностью, сложно представить себе голодовку в темноте длиной в 100 млн лет. Донный осадок по плотности напоминает шоколадный торт, выпеченный без муки, и диаметр его пор составляет примерно 0,02 мкм. Зная, что типичная бактерия имеет несколько микрометров в поперечнике, можно предположить, как трудно микробам было ползать в поисках пищи или в надежде выбраться.

Некоторые бактерии, в основном анаэробные, образуют укрепленные и метаболически неактивные структуры, называемые эндоспорами, и в таком виде переживают неблагоприятные условия. Предполагается, что часто именно они помогают бактериям пережить тысячи и миллионы лет. Но когда ученые идентифицировали клетки из «полюса недоступности» с помощью ДНК-тестов, они практически не обнаружили среди них спорообразующих типов. Оказалось, что большинство найденных микроорганизмов к тому же дышат кислородом.

Один из образцов спустя 557 дней инкубации преподнес ученым еще один сюрприз — в нем обнаружилась процветающая популяция фотосинтезирующей бактерии. Эта цианобактерия, называемая *Chroococcidiopsis*, имеет такую внушительную



Буровое судно JOIDES Resolution собирало донные осадки из океанских глубин под Южно-Тихоокеанским круговоротом

репутацию по части живучести, что рассматривалась как кандидат на терраформирование Марса. Помимо способности жить в плохо проницаемых горных скальных породах в сухих, холодных, просоленных местах с высоким уровнем радиации, она обладает необычным умением — получать энергию из красного света. Но как питающаяся светом бактерия смогла размножиться в темной камере в лаборатории, остается загадкой.

Стоит отметить, что, хотя исследованному донному осадку около 100 млн лет, возраст отдельных клеток остается неясным. Возможно, некоторые из них — потомки исходного сообщества, существовавшего 100 млн лет назад, и поэтому сами гораздо моложе. Но размножение — весьма дорогое удовольствие, и в таких условиях оно наверняка было очень редким. Учитывая тесные поры, отсутствие спор и быструю «реанимацию», авторы статьи в *Nature Communications* полагают, что микроорганизмы в истощенном осадке были все это время живы, но находились в неактивном состоянии.

Ученые подумывали о том, что бактерии способны пережить миллионы лет, не размножаясь. (Так ли это, будет известно лишь после появления технологий датировки самих микроорганизмов, а не только осадочных пород.) Несколько лет

назад в заметке для блога *Scientific American* я писала о бактериях, «возрожденных» из палеозойского каменноугольного пласта, и предполагала, что при определенных условиях (очень ограниченных, но, возможно, встречающихся часто) бактерии могут быть практически бессмертными. Время делает свое дело: самые старые клетки из меловых донных отложений размножились примерно в два раза медленнее, чем их более проворные собратья, находившиеся там «всего» несколько миллионов лет. Но растущее число фактов позволяет предположить, что мы буквально сидим на горе из настоящих живых ископаемых — организмов одновременно и ископаемых, и живых.

В распоряжении любителей древней фауны (сказать по правде, кто из нас к ним не относится?) — музеи, полные костей, зубов и следов. К услугам любителей растений — окаменевшие леса и отпечатки папоротников. Но у любителей микробов есть кое-что получше: наши «динозавры» живы. ■

Перевод: Г.Ф. Куракин

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Foiling a Faint Sun. Sarah Simpson; April 2003.



ПЛАНЕТОЛОГИЯ

РАЗБИТЫЙ ЩИТ

Ученые только что утратили один из своих лучших инструментов для защиты Земли от потенциально опасных астероидов.

Что дальше?

Сара Скоулс

Островки зелени видны сквозь дыры в тарелке телескопа «Аресибо», после того как в конце 2020 г. оборвались тросы и подвесная кабина обрушилась

ОБ АВТОРЕ

Сара Скоулс (Sarah Scoles) — научный журналист, проживает в Денвере. Внештатный автор сценариев еженедельной телепрограммы *WIRED Science*, внештатный редактор журнала *Popular Science* и автор книг «Установление контакта: Джилл Тартер и поиски внеземного разума» (*Making Contact: Jill Tarter and the Search for Extraterrestrial Intelligence*, 2017) и «Они уже здесь: культура НЛО и почему мы видим летающие тарелки» (*They Are Already Here: UFO Culture and Why We See Saucers*, 2020).



Первые несколько секунд видео, снятого на радиотелескопе «Аресибо» 1 декабря 2020 г., не предвещали ничего плохого. Ну да, в августе и ноябре прошлого года случился обрыв поддерживающих тросов, что привело к повреждению 300-метрового зеркала антенны. И, конечно же, Национальный научный фонд уже собирался вывести «Аресибо», инструмент, который начал сканировать небо в 1963 г., из эксплуатации. Так что для телескопа ситуация складывалась не лучшим образом. Но по крайней мере он все еще существовал.

Все изменилось за несколько мгновений до восьми часов утра, когда, словно по команде, с опорной стойки поднялось облачко пыли. Оказывается, это начал обрываться трос. Получив дополнительную нагрузку, стали рваться и другие тросы. Вслед за этим начала опрокидываться и массивная платформа для размещения оборудования, когда-то подвешенная над чашей зеркала обсерватории. После агонии медленного опрокидывания платформа рухнула вниз. Оборвались еще несколько тросов, и обломки разлетелись во все стороны, как при подрыве. В заключительной части видеосюжета мы видим гигантские дыры, образовавшиеся в зеркале легендарного телескопа, и поднимающуюся вокруг пыль. «Аресибо», по крайней мере тот, каким его знали ученые, прекратил свое существование.

Когда Эдгард Ривера-Валентин (Edgard Rivera-Valentín), научный сотрудник Института по изучению Луны и планет и в прошлом член группы, исследовавшей планеты с помощью радара в Обсерватории Аресибо, включил просмотр видео, люди смогли выдержать всего несколько секунд. Им потребовались дни, чтобы до конца просмотреть двухминутный сюжет. «Когда все рухнуло, это было... я назвал бы это словом "трагедия", — говорит Ривера-Валентин, уроженец Пуэрто-Рико.

Радиотелескоп «Аресибо» оставил легендарное наследие многих лет научных открытий, изучения

космической погоды, поиска инопланетян, определения временных параметров излучения пульсаров, картографирования облаков нейтрального водорода. Но у него был и еще один необычный повод для гордости: он мог похвастаться самой мощной, чувствительной и активной радарной системой для исследования планет. С помощью этого радара удавалось заглянуть сквозь плотную атмосферу Венеры и нанести на карту рельеф покрытой пылью поверхности Марса, но кроме того он помогал защищать Землю от астероидов. Полученные с его помощью данные позволили ученым разглядеть в деталях эти каменные глыбы и оценить, представляют ли они угрозу, а также помогли выработать адекватные меры на случай, если бы астероид приближался к нам. «Один из замечательных аспектов исследований космоса с помощью радара заключается в том, что вы активно защищаете всю Землю, — говорит Ривера-Валентин. — Поэтому если кто-то спросит вас: "Какое мне-то до этого дело?", ответом будет что-то вроде: "Я прослежу за тем, чтобы астероид не пришел за тобой"».

Исследования космоса с помощью радара «Аресибо» лежат в русле общей повестки по «созданию системы планетарной защиты» — попытке выявить и предотвратить потенциально возможные столкновения между астероидом (или кометой) и нашей планетой, которую в идеале мы хотели бы сохранить нетронутой.



Утром 15 февраля 2013 г. астероид размером с дом влетел в атмосферу Земли и взорвался над Челябинском. Это событие стало напоминанием о потенциальной опасности падения камней из космоса.

Вероятность того, что в тот или иной конкретный день космическая каменная глыба, неся разрушения, врежется в Землю, мала. Однако последствия подобной катастрофы будут тяжелыми. А история нашей Солнечной системы — усыпанные кратерами небесные тела, падение метеоритов на другие планеты, отмеченные за последнее время, огромные объекты, пронесшиеся в атмосфере Земли и запечатленные видеорегистраторами, — служат наглядной демонстрацией закона статистики, что события, вероятность которых произойти в какой-нибудь конкретный день мала, все-таки происходят, если дней достаточно много. Именно поэтому в NASA есть целое подразделение, занимающееся этой проблемой. Именно поэтому множество астрономических инструментов собирают данные, позволяющие заблаговременно заметить опасность. Именно поэтому предстоящая космическая экспедиция должна показать, что смогут предпринять земляне, если будет обнаружено, что космическая глыба действительно летит на нас.

Но достаточно ли всего этого? Поскольку радиотелескоп «Аресибо» и его радар прекратили работу, наш арсенал планетарной защиты стал неэффективным. США и другие страны оценивают риск,

лихорадочно ищут новые подходы, которые позволили бы заранее выявить угрозу, и формулируют планы относительно того, что можно было бы предпринять в будущем.

Подсчет космических каменных глыб

Самая большая угроза для планетарной защиты исходит от недооценки опасности. Все-таки апокалипсис в результате столкновения с астероидом представляется нам скорее сюжетом художественных фильмов, а не делом серьезной науки. Но официальные лица начали уделять этой угрозе больше внимания вскоре после того, как в 1994 г. комета Шумейкеров — Леви направилась прямо к Юпитеру. Линда Биллингс (Linda Billings), консультант программы NASA по распространению информации о планетарной защите, вспоминает происходившее, когда столкнулись эти два небесных тела. 21 июля 1994 г., через несколько дней после начала серии столкновений, она пошла на открытый показ в Военно-морскую обсерваторию в Вашингтоне, округ Колумбия, где можно было следить за Юпитером. На лужайке снаружи астрономы-любители навели свои телескопы на покрытую шрамами планету. Гравитация Юпитера разорвала комету на части, которые устремились

в закрученную вихрями атмосферу планеты, разогреваясь до температуры 40 тыс. градусов Цельсия и выбрасывая в космос облака вещества высотой 3 тыс. км. «Мы получили железное доказательство того, что такие столкновения происходят», — рассказывает Биллингс.

Вскоре после этого были опубликованы два официальных отчета ВВС США, *SpaceCast 2020* и *Air Force 2025*, о том, что военные могут или должны будут сделать в предстоящие десятилетия для снижения угрозы столкновения с каменными глыбами из космоса. Столкновения с космическими объектами стали проблемой национальной безопасности. В первом отчете, в котором обсуждается, каким образом США могли бы удерживать «высокую планку» в космосе, был введен термин «планетарная оборона». Второй во многом был посвящен этой же проблеме, и в обоих рассматривались вопросы обнаружения астероидов и минимизации негативных последствий (термин, обозначающий мероприятия по устранению угрозы, если таковая возникнет) — например, можно изменить орбиту астероида, направив на него космический аппарат, или взорвать вблизи него ядерный заряд.

В то время ученые, сегодня хорошо известные своей деятельностью по защите планеты, служили в Военно-воздушных силах США — это Линдли Джонсон (Lindley Johnson), ныне руководитель программы Координационного управления планетарной защиты NASA и автор соответствующей части отчета *SpaceCast*, а также Пит Уорден (Pete Worden), бывший директор Исследовательского центра им. Эймса NASA. Они и их коллеги предупредили об опасности превращения нашей цивилизации в кратер. Но после событий 11 сентября этому вопросу не было уделено столько внимания, сколько многим хотелось бы. В 2003 г. Джонсон ушел со службы в отставку. «В NASA сказали: "Идите к нам. У нас есть для вас подходящая работа"», — вспоминает он. Одной из его обязанностей стало выполнение программы NASA по наблюдению за околоземными объектами. Сегодня, во многом благодаря усилиям Джонсона, она переросла в целое управление по координации планетарной защиты, которым он и руководит. «Если честно, неожиданное столкновение стало бы самым большим стихийным бедствием, которое нам пришлось бы увидеть», — говорит Джонсон. Его управление надеется, что сможет предотвратить любое возможное столкновение.

С этой целью управление NASA ведет программы по сбору данных об астероидах, частично полагаясь на широкоугольные оптические и инфракрасные телескопы, которые могут обозревать широкие просторы неба. Обсерватории, находящиеся в ведении соответственно Аризонского и Гавайского университетов, работали с управлением Джонсона, чтобы превратить свои существующие

телескопы в стражей неба. Благодаря усилиям группы космическая обсерватория *WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer, Широкоугольный исследовательский аппарат для инфракрасной съемки)* спустя несколько лет после прекращения работы в 2011 г. была выведена из состояния сна и перепрофилирована в *NEOWISE (Широкоугольный исследовательский аппарат для инфракрасной съемки околоземных объектов)*. Недавно обсерватория *NEOWISE* завершила свой 14-й сеанс фотографирования всего неба и сейчас работает над 15-м.

Между тем компьютерная программа *LINEAR (Программа Лаборатории им. Линкольна для исследования сближающихся с Землей астероидов)*, созданная в Массачусетском технологическом институте, в настоящее время установлена на объекте военно-воздушных сил, называемом «Телескоп космической разведки» (*SST*), в Австралии. Это программное обеспечение по некоторым параметрам делает указанную военную обсерваторию самым продуктивным в мире инструментом поиска астероидов. С его помощью было обнаружено 142 ранее неизвестных околоземных объекта, четыре потенциально опасных объекта и восемь новых комет.

Это прекрасно, но не настолько, как хотелось бы конгрессу. По утверждению Джонсона, официальное требование на сегодня — выявить 90% объектов размером 140 м и более. Удар каменной глыбы такого размера станет «черным днем везде, где бы ни были». Таких злостных созданий насчитывается около 25 тыс. «Мы постепенно приближаемся к этой цифре, и, возможно, к концу года количество обнаруженных достигнет 10 тыс.», — объясняет он. За 20 лет работа завершена на 40%. В целом ученые обнаружили более 25 тыс. сближающихся с Землей астероидов всех размеров; около 19 тыс. из попавших в объектив камеры имеют в поперечнике более 30 м.

На смену «Аресибо»

30 космических организаций, разбросанных по всему миру от Латвии до Колумбии, от Китая до Израиля, в том числе преданные делу любители, национальные космические агентства и отдельные обсерватории образуют Международную сеть предупреждения об астероидах. Эта группа, сформированная по рекомендации Организации Объединенных Наций, координирует деятельность по наблюдению и реагированию на угрозы для нашей уязвимой планеты. С 2016 г. она зарегистрировала более 300 сближений, когда ожидалось, что астероид пройдет от нас на удалении в пределах среднего расстояния между Землей и Луной. Она координировала также три кампании по отработке «ресурсов наблюдений и возможностей определения характеристик, которые могут быть применены к сближающемуся с Землей объекту в достаточно короткие сроки».

Как столкнуть с пути астероид

Что будет, если ученые обнаружат большую космическую каменную глыбу, направляющуюся к Земле? У человечества есть несколько вариантов, чтобы попытаться столкнуть небесное тело с курса, но ни один из них не был проверен на практике. Некоторые из них, такие как применение ядерного оружия против летящей к нам каменной глыбы, несут с собой собственные риски — например, вероятность того, что обломки, образовавшиеся при взрыве, все же смогут достичь нашей планеты.

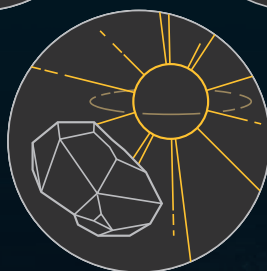
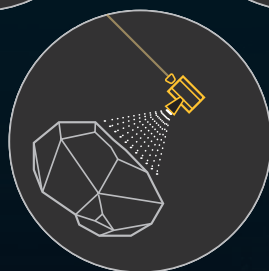
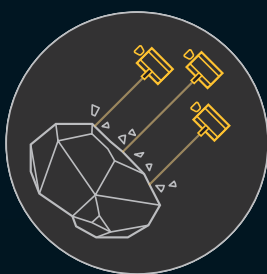
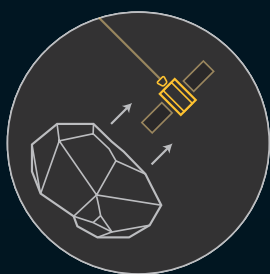
Возможные способы столкнуть астероид с курса

Запустить к астероиду тяжелый космический аппарат и поместить его рядом с ним, чтобы тот действовал как «гравитационный тягач», на протяжении десятилетий отклоняя его с первоначального направления.

Стрелять лазером с небольшого космического корабля, чтобы испарять вещество астероида, которое, отлетая с поверхности, создаст давление в противоположном направлении.

Освещать астероид, перенаправляя солнечный свет зеркалом, что заставит камень терять вещество и будет отталкивать астероид с орбиты.

Если астероид достаточно твердый, посадить на его поверхность ракетную установку, чтобы с ее помощью отклонить его с первоначальной траектории.



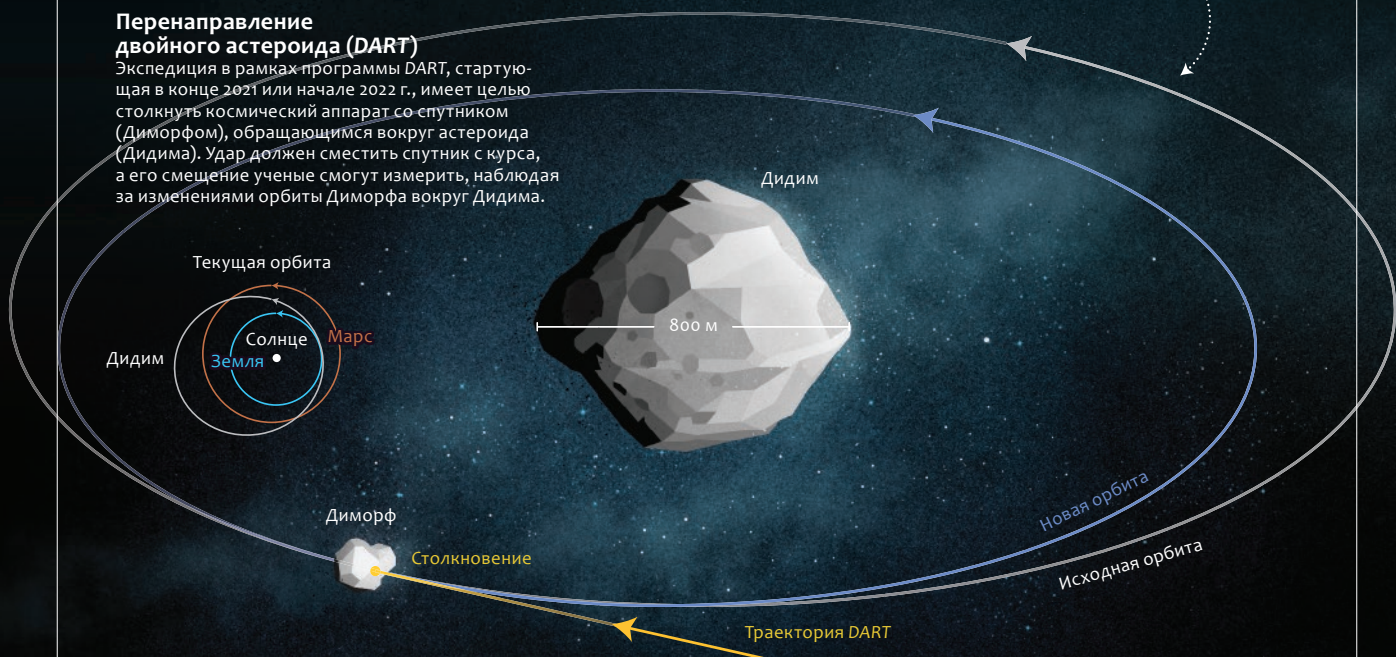
Покрасить астероид, изменив его тепловые свойства таким образом, чтобы солнечный свет сместил его с первоначального курса.

Взорвать рядом с объектом ядерный заряд, передав ему дополнительную энергию и столкнув его с курса.

Устроить столкновение космического аппарата с астероидом до того, как тот врежется в Землю. Ученые надеются проверить этот метод в ходе эксперимента DART.

Перенаправление двойного астероида (DART)

Экспедиция в рамках программы DART, стартующая в конце 2021 или начале 2022 г., имеет целью столкнуть космический аппарат со спутником (Диморфом), обращающимся вокруг астероида (Дидима). Удар должен сместить спутник с курса, а его смещение ученые смогут измерить, наблюдая за изменениями орбиты Диморфа вокруг Дидима.





В ходе намеченной к запуску в этом или следующем году экспедиции DART (Эксперимент по перенаправлению двойного астероида) будет предпринята попытка изменить курс космической каменной глыбы, направив в нее космический аппарат

Это полезно, поскольку при обнаружении объектов в опасной близости работа не заканчивается. Наземные оптические и инфракрасные телескопы, расположенные в таких местах, как Гавайи, Нью-Мексико и Аризона, проводят последующие наблюдения, чтобы узнать об объектах больше, нежели просто факт их существования. Наземный радар обычно также выполняет задачу по уточнению орбит недавно обнаруженных астероидов и прогнозированию их орбит на годы вперед, помогая рассчитать, куда эти объекты полетят в будущем и возможно ли их столкновение с Землей. Радар также помогает выяснить форму, состав и траекторию астероидов.

Принцип радиолокационных наблюдений вроде тех, что велись с помощью «Аресибо», заключается в следующем: если направить мощный импульс радиоволн на объект, он отразится назад, измененный за счет вращения, поступательного движения, формы и размеров объекта, а также из-за наличия спутников, которые, возможно, имеет этот астероид. Время, которое требуется радиоволнам, чтобы вернуться назад, показывает точное расстояние от объекта до Земли. Имея на руках всю эту информацию, вы можете уточнить его орбиту и предсказать, где он будет в далеком будущем и включает ли это «где» Айову. Вы также можете выяснить его свойства — что полезно, если вам потребуется столкнуть его с курса. Плотный ли он? Пористый? Круглый? Вытянутый, как арахис? «Когда мы записываем возвратившееся эхо, если сигнал каким-либо образом отличается от того, что отправили,

мы знаем, что это произошло в силу тех или иных свойств объекта, в данном случае астероида», — объясняет Патрик Тейлор (Patrick Taylor), старший научный сотрудник Института по изучению Луны и планет и бывший руководитель группы радиолокационной программы «Аресибо».

Наблюдение с помощью радара чем-то похоже на фотографирование астероида с безопасного места на Земле. «Это что-то вроде облета астероида космическим зондом за мизерную долю стоимости такой экспедиции, — рассказывает Эллис Хауэлл (Ellen Howell) из Аризонского университета. — Мы получаем их изображения в виде каменной глыбы, а не просто светлой точки».

Это важно, потому что, как любят повторять планетологи, если вы видели один астероид, то видели всего лишь один астероид (аллюзия на известную британскую поговорку «Если вы видели одного из них, вы видели их всех», которую используют, когда хотят сказать, что все указанные объекты выглядят одинаково. — Примеч. пер.). По словам Хауэлл, с потерей «Аресибо» «эти возможности существенно уменьшились». Именно такая способность наблюдать за настоящим, предсказывать, а затем и изменять будущее, вероятно, отличает нас от бедолаг прошлых эпох, которым оставалась лишь принять все удары, которые посылал на их голову космос. «У динозавров не было космической программы, — говорит Ривера-Валентин. — А у нас есть».

«Аресибо» был не единственным в США радаром для исследования планет. Остается еще один —

Радар для исследования Солнечной системы в Голдстоуне, находящийся в Калифорнии, — но он способен обнаружить меньше половины околоземных астероидов из тех, что мог увидеть «Аресибо». Но даже если бы радар в Голдстоуне был идеальным инструментом, в жизни может случиться всякое, а если перестанет работать и он — как это было в течение примерно 18 месяцев проведения профилактических работ, незадолго до разрушения «Аресибо», — нашей планете придется лететь в космосе полуслепой. «Потеря "Аресибо" заставит людей серьезнее задуматься о том, каким будет этот шаг следующего поколения, — говорит Тейлор. — Но каким он будет, я не знаю».

У ученых есть определенные соображения. Часть из них хотела бы построить «Аресибо 2.0», заставив в том же самом месте на острове совместно, как одна большая антенна, работать несколько тарелок меньшего диаметра, тем самым восстановив возможность радиолокации астероидов. В Обсерватории Грин-Бэнк в Западной Виргинии ученые совместно с оборонным подрядчиком, компанией *Raytheon*, только что провели свою собственную демонстрацию, послав радиолокационный импульс к Луне и уловив отраженный сигнал разбросанными по всей территории США тарелками Антенной решетки со сверхдлинными базами (*Very Long Baseline Array*), которые управляется из Сокорро, штат Нью-Мексико. Они надеются, что это проложит путь для строительства установки большей мощности, которая могла бы взять на себя задачу по поиску и изучению астероидов. «Предложение по модернизации радиотелескопа в Грин-Бэнк (*радиотелескоп Обсерватории Грин-Бэнк — полноповоротный параболический радиотелескоп с самой большой в мире тарелкой диаметром 100 м. — Примеч. пер.*) звучит для меня потрясающе, — говорит Биллингс. — Но деньги на это еще не выделены».

И даже если бы это было так, Майкл Нолан (*Michael Nolan*) из Аризонского университета сомневается, что телескоп «Грин-Бэнк» сможет стать полноценной заменой «Аресибо». Передача сигнала из одного места и получение в другом — это подход, требующий обработки большого объема данных, а использование для выполнения обеих задач телескопа в Грин-Бэнке имеет свои особенности. «Из того, что я видел до сих пор, я не вижу ничего, что могло бы служить рабочей лошадкой системы планетарной защиты», — замечает Нолан. Для предполагаемой замены телескопа «Аресибо», например, средства тоже не выделены.

И вопрос, что делать, — лишь первое препятствие. Еще более важный вопрос — кто должен это делать. Некоторые эксперты утверждают, что бремя слишком тяжело, чтобы научное сообщество могло нести его в одиночку. Возможно, говорят они, задача должна быть возложена на плечи

организации, обладающей большим опытом долгосрочного планирования и, что еще важнее, имеющей стабильное финансирование. Другими словами, на Министерство обороны, а именно на его недавно созданные Космические силы.

Как остановить астероиды

Космические силы, новое подразделение вооруженных сил, которое в основном занимается спутниками, их безопасностью и охраной, нацелены на отслеживание больших и малых объектов отсюда и до Луны, по мере того как международная и коммерческая активность в космосе — спутники, космические корабли, орбитальные производственные системы, космический туризм — набирает обороты. Это задача называется обеспечением ситуационной осведомленности в космосе и обычно решается с помощью оптических инструментов и радаров большого радиуса действия. В то время как этот радар отслеживает обстановку на орбите, он также может обнаруживать астероиды, которые летят в космосе в том же секторе, что и спутник (но, надеемся, намного дальше). Официальные представители NASA и Космических сил говорили о сотрудничестве в создании такой бесприоритетной системы. «Это уже вышло за рамки мозгового штурма, но мы еще не определились с конкретной концепцией», — говорит Джонсон, отмечая, что обсуждение продолжается. В 2020 г. эти две организации подписали договор о намерениях, согласившись работать вместе над определенными вещами, в том числе и планетарной защитой, и осведомленностью о космической обстановке. Космические силы вернули NASA вопросы о сотрудничестве для нового рассмотрения.

Однако некоторые хотят расширить идею по вовлечению в эту работу вооруженных сил. Питер Гарретсон (*Peter Garretson*), старший научный сотрудник Американского совета по внешней политике и бывший руководитель Целевой группы по исследованию космических горизонтов Авиационного университета, хотел бы, чтобы военные возглавили усилия по планетарной защите, особенно по смягчению негативных последствий. «NASA — в первую очередь научно-исследовательское агентство. В моем понимании, это явно оборонная задача, — говорит Гарретсон. — Астероид необходимо отклонить не в научных целях».

И действительно, сегодня нет такой федеральной организации, перед которой была бы поставлена конкретная задача по отражению астероидов. Но в любом случае люди над этим работают. Одно из агентств, принимающих активное участие в этой работе, — Министерство энергетики, которое занимается разработкой и производством ядерного оружия. В Лос-Аламосской национальной лаборатории Кэти Плеско (*Cathy Plesko*) проводит исследования по снижению ущерба от встречи

с астероидом. В программу планетарной защиты она попала, поскольку с помощью компьютерных моделей изучала метеоритные кратеры на Марсе. «Но как предотвратить образование кратеров?» — задумывалась она. Однажды старший астрофизик лаборатории сказал, что, по его мнению, ту же самую программу, которую она использовала для моделирования [образования] кратеров, можно применить для моделирования мер по недопущению ущерба от астероидов: она покажет, как поведет себя астероид, если что-нибудь столкнется с ним, а не он с каким-нибудь небесным телом. Это было именно то, о чем она давно размышляла.

Она занялась этой проблемой, но в целом работа в этом направлении в лаборатории велась ни шатко ни валко до февраля 2013 г. В том месяце астероид размером 20 м в поперечнике пронесся сквозь атмосферу и взорвался на высоте почти 30 км над Челябинской областью России с силой около 450 кт тринитротолуола, 1,6 тыс. человек получили травмы. Как и в случае с кометой Шумейкеров — Леви, чиновники быстро осознали серьезность проблемы. Группа Плеско сосредоточилась на ее решении и совместно с NASA приступила к поиску ответа на вопрос, какие физические задачи необходимо решить, чтобы адекватно отреагировать, если прилетит что-нибудь более серьезное и ужасное. Работа начинается с изучения вопроса, из чего состоят астероиды, на удивление сложной задачи, и радар для этого — лучшее решение при проведении исследований с Земли. «Это груды щебня? Что-то вроде комочков грязи? Или железные болванки? — задается вопросом Плеско. — Вариантов очень много». Такая многовариантность затрудняет моделирование. Если вы моделируете на компьютере самолет, вы точно знаете его плотность и форму. «Такого рода спецификаций для комет и астероидов у нас нет, — говорит она. — Именно это мы и должны выяснить».

Сегодня Плеско исследует множество способов того, как отвести от земного шара различные виды астероидов. Один из вариантов называется гравитационным буксировщиком. Вы запускаете самый тяжелый космический аппарат, какой только можете построить, чтобы он приблизился к космической каменной глыбе сбоку настолько близко, насколько это возможно. «Со временем ваш космический аппарат сможет увести астероид или комету с первоначального курса», — говорит она. Но для этого потребуются десятилетия «ухаживания», а технология эта, по оценке Плеско, не появится еще в течение примерно 100 лет.

Некоторые ученые исследовали возможность использовать пристыкованный к небольшому космическому аппарату лазер, чтобы нагревать и испарять материал астероида, отбрасывая его с поверхности, и таким образом (поскольку каждое действие вызывает равное ему противодействие)

толкать астероид в противоположном направлении. Можно также просто-напросто ударить астероид, направив на космическую глыбу космический корабль, прежде чем та врежется в Землю. Другие варианты: направить на астероид и сфокусировать на нем с помощью зеркала солнечные лучи, пока он не начнет плавиться и терять вещество; подвинуть его с помощью ракет; раскрасить его, чтобы изменить его тепловые свойства, а значит, и его орбиту. Плеско, будучи сотрудником Министерства энергетики, изучает и более «шумный» вариант из списка предлагаемых: «отклоняющий ядерный взрыв». То есть можно взорвать ядерный заряд вблизи угрожающего Земле объекта, сообщив ему дополнительную энергию и оторвав некоторое количество материала. Это отклонит камень так же, как и при использовании других методов, только, как вы понимаете, значительно сильнее. Но исследования взрыва ядерной бомбы на поверхности астероида или внутри него показывают, что он может распасться на более мелкие куски, которые сами по себе создают проблемы. В любом случае этот вариант быстро обрастает дополнительными сложностями, если учесть природу ядерных бомб и международный запрет на размещение оружия массового уничтожения в космосе. Страна может использовать «подготовку к отражению астероидов» как предлог для распространения ядерного оружия; к тому же астероид представляет собой угрозу для всего человечества, однако для борьбы с ним использовать собственный арсенал будет какая-то одна страна. «Никто не относится к этому легкомысленно», — говорит Плеско.

Каждые два года мировое сообщество разыгрывает ролевую игру в стиле «Подземелий и драконов», в которой [космические] агентства представляют свою версию ответа на вымышленный сценарий планетарной защиты. Информация о характере угрозы заранее публикуется в интернете и каждый день дополняется новыми инструкциями в виде презентаций *PowerPoint*. В 2019 г., незадолго до прибытия на совещание, его участники знали, что для глыбы, имеющей в поперечнике 100–300 м, вероятность столкнуться с Землей через восемь лет составляет 1%. На третий день они знали, что она имеет 260 м в длину и 140 м в ширину и держит курс прямо на Денвер.

Пока группа разрабатывала схему экспедиции по отклонению проблемного объекта с курса, отклонившийся от него кусок размером 60 м в поперечнике взял курс на Манхэттен. Участники ролевой игры переключились в режим минимизации последствий катастрофы, изучая средства и пути эвакуации, вопрос, что делать с химическими заводами и атомными электростанциями, а также оценивали ее экономические последствия. В этом году участники вернулись к игровому столу (по видео-конференц-связи), чтобы решить, как

поступить с астероидом, который может нанести нам визит уже через шесть месяцев. Все эти тренинги «позволяют в условиях, приближенных к реальным, проверить, сколько времени потребуется, чтобы что-нибудь предпринять», — говорит Плеско. Она добавляет, что это непохоже на голливудский фильм, где ситуация решается примерно так: «Обнаружен астероид; давайте запустим эту штуковину». Тем не менее продуманное реагирование — это то, что человечество может реально предпринять, даже если и не так быстро, как на экране.

Тестовый запуск

Уже вскоре смелый проект позволит проверить нашу способность двигать горы в космосе. Цель намеченной к запуску на конец 2021 г. или начало 2022 г. экспедиции *DART* (*Double Asteroid Redirection Test*, Эксперимент по перенаправлению двойного астероида) — продемонстрировать, что мы можем изменить орбиту астероида, словно путь непослушного подростка. Эндрю Ривкин (*Andrew Rivkin*), один из руководителей исследовательской группы экспедиции, занимался изучением астероидов, чтобы внести вклад в фундаментальную науку о происхождении Солнечной системы. «На какой бы вопрос вы ни пытались ответить, все чудесным образом возвращается к астероидам», — говорит он. К тому же, добавляет он, их куски можно купить на платформе *eBay*.

Или можно построить космический аппарат, чтобы оттолкнуть астероид в сторону, что сейчас и делает Ривкин. *DART* отправится к системе Дидима, где есть к большому астероиду Дидиму и его маленькому спутнику Диморфу. Затем космический аппарат врежется в спутник, изменив орбиту Диморфа вокруг его более крупного брата, а значит, и характер движения последнего вокруг Солнца. 610-килограммовый космический аппарат столкнется с «маленьким» (массой 4,8 млрд кг) Диморфом со скоростью 6,58 км/с, изменив (как считают ученые) период его обращения примерно на 10 мин. Поскольку размеры Диморфа таковы, что этот астероид в одиночку способен представлять угрозу городам, ученые надеются увидеть, насколько хорошо они могут передавать импульс космического аппарата космической глыбе. Подобный вариант устранения угрозы средней степени — нечто промежуточное между «либо уничтожьте его с помощью ядерного заряда, либо прячьтесь в убежище», как обрисовывает ситуацию Ривкин. Его можно назвать также предотвращением столкновения с помощью другого столкновения. Это универсальный метод, который работает и в случае с одним астероидом — космический аппарат можно направить на одиночку, — но у ученых есть веская причина для выбора в качестве объекта такого теста двойной системы: в этом случае легко измерить, насколько вы изменили орбиту спутника, потому что

вы можете вживую непосредственно наблюдать, как он проходит перед более крупным астероидом.

Ученые получают возможность впервые увидеть систему (в виде одинокого пикселя) примерно за месяц до столкновения в 2022 г. «Именно к этому единственному пикселю мы пытаемся направить наш космический аппарат», — говорит Елена Адамс (*Elena Adams*), системный инженер экспедиции. За час до столкновения они разглядят спутник и начнут подруливать по направлению к нему. «А потом — ба-бах! — и мы теряем контакт, что на самом деле хорошо», — объясняет Адамс. Значит, все прошло как надо. («И ведь, представьте, кто-то платит нам за эту работу! — ликует Адамс. — За то, чтобы разбить вдребезги космический аппарат стоимостью \$250 млн!»)

Группа *DART* надеется, что радар в Голдстоуне и космические телескопы также будут наблюдать это шоу. «Мы надеялись, что и "Аресибо" тоже», — с грустью говорит Ривкин. На основе полученных во время столкновения и после него данных будут созданы новые модели, которые будут использованы такими учеными, как Плеско, для выработки стратегии реагирования на реальную астероидную угрозу. «Такие программы, как *DART*, — это страховка на случай, если мы все же обнаружим что-нибудь [угрожающее]», — говорит Ривкин. Люди платят, страхуясь от пожара и наводнения; они проверяют свои подвалы на радон. «Мы надеемся и ожидаем, что тест на радон не обнаружит радона и что в доме не произойдет ни возгорания, ни наводнения, но мы в каком-то смысле проявляем необходимую осмотрительность».

Хотя Ривкин рад, что люди больше не считают планетарную защиту какой-то шуткой и теперь вполне осознают полезность космической страховки, он предостерегает от нагнетания страхов по поводу нашествия космических каменных глыб. «Если астероиды не дают людям спать по ночам, надеюсь, что это связано с размышлениями по поводу крутости всей науки», — говорит он. Фактически именно эта наука — разработка методов обнаружения, отслеживания, прогнозирования и определения характеристик этих одиноких странников — лежит в основе всей системы защиты планеты. А планетарная защита, в свою очередь, позволяет людям вырвать у космоса некоторые рычаги управления. «Впервые в истории у нас как у вида есть шанс предотвратить стихийное бедствие, — говорит Плеско. — Мы не можем остановить ураган или обратить вспять землетрясение. Мы не можем просто взять какой-нибудь суперклей и заделать им разлом Сан-Андреас». А вот остановить планетарного убийцу? «Если потребуется, я действительно уверена, что нам это под силу», — заявляет исследовательница. ■

Перевод: А.П. Кузнецов



НОВЫЕ СПОСОБЫ

СТАЛКИВАТЬ

Чтобы достичь новых пределов фундаментальной физики, ученые должны создать еще более мощные ускорители элементарных частиц

Чандрашекхар Джоши

ЧАСТИЦЫ!

ОБ АВТОРЕ

Чандрашекхар Джоши (Chandrashekar Joshi) — заслуженный профессор электротехники Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, где он возглавляет Группу лазерной плазмы, лауреат премии им. Джеймса Клерка Максвелла Американского физического общества в области физики плазмы.



В

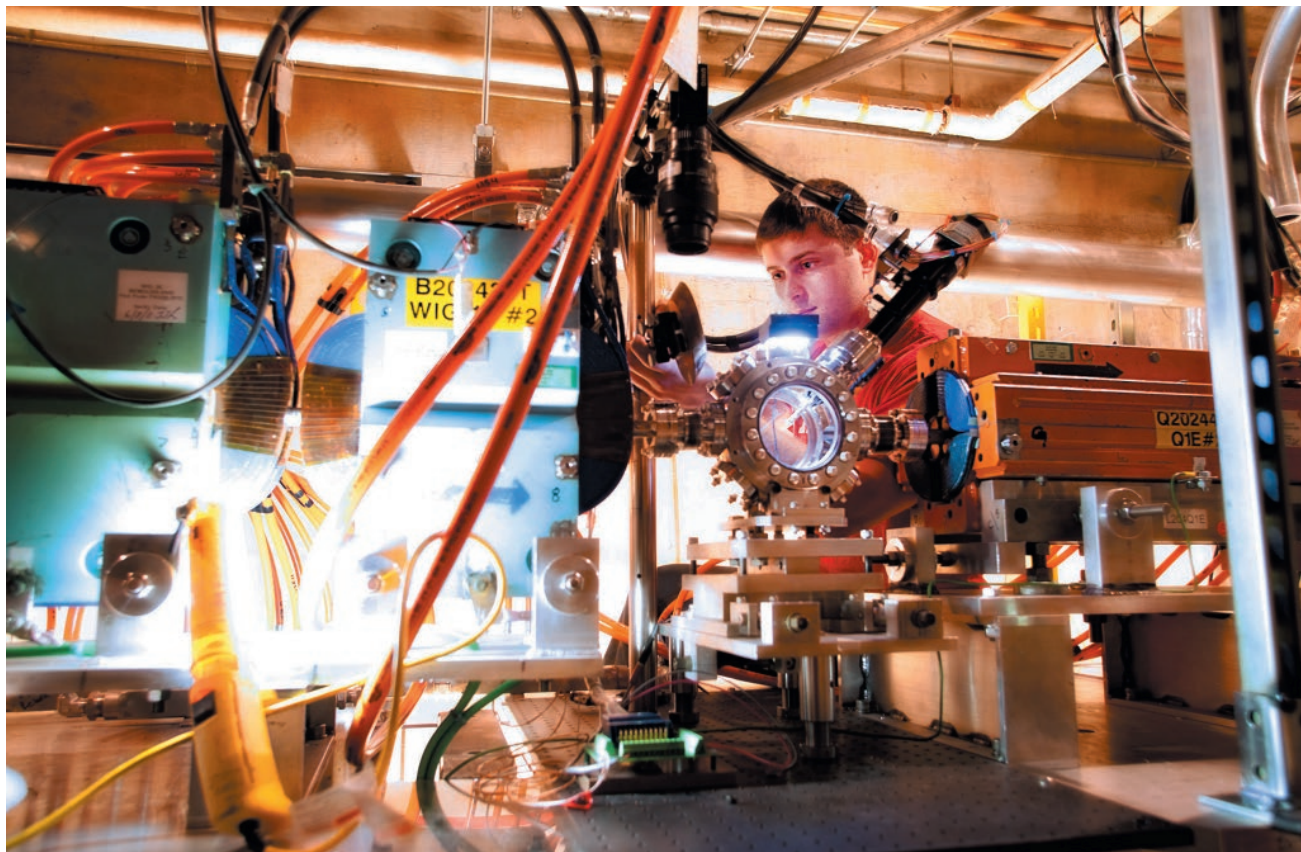
начале XX в. ученые мало что знали о строительных кирпичах, из которых состоит наш физический мир. К концу века они открыли не только все элементы, составляющие фундамент всей наблюдаемой материи, но и множество еще более фундаментальных частиц, из которых состоят наш космос, наша планета и мы сами. И инструмент, позволивший совершить эту революцию, — ускоритель элементарных частиц.

Вершина достижений ускорителей элементарных частиц пришлась на 2012 г., когда на Большом адронном коллайдере (БАК) была обнаружена долгожданная частица — бозон Хиггса. БАК — это 27-километровое кольцо ускорителя *CERN*, расположенное недалеко от Женевы, в котором сталкиваются два пучка протонов с энергией 7 трлн эВ (ТэВ) каждый. Это самый большой, самый сложный и, пожалуй, самый дорогой научный объект из когда-либо созданных. Бозон Хиггса был последним звеном господствующей теории физики элементарных частиц, называемой Стандартной моделью. Тем не менее за почти десять лет, прошедших со времени этого открытия, ни это устройство, ни какой-либо другой ускоритель не обнаружили ни одной новой частицы.

Неужели мы нашли все частицы, которые было необходимо найти? Сомнительно. Стандартная модель физики элементарных частиц не объясняет темную материю — частицы, которых во Вселенной много, но они невидимы. Популярное расширение Стандартной модели, называемое суперсимметрией, предсказывает гораздо больше

частиц, чем нам известно. Есть у физиков и другие остающиеся без ответа глубинные вопросы, например: существуют ли дополнительные измерения пространства и почему в наблюдаемой Вселенной большой дисбаланс материи и антиматерии? Чтобы разгадать все эти загадки, нам, вероятно, понадобится более мощный коллайдер, чем те, которые есть в нашем распоряжении сегодня.

Многие ученые поддерживают план создания Международного линейного коллайдера (МЛК) — ускорителя, вытянувшегося вдоль прямой, в котором частицы будут сталкиваться с энергией 250 млрд эВ (или 250 ТэВ). Хотя МЛК не такой мощный, как БАК, в нем электроны будут сталкиваться с их двойниками из антивещества, позитронами; и те и другие — фундаментальные частицы, столкновения которых, как ожидается, позволят получить гораздо более четкие данные, чем столкновения протонов с протонами в БАК. К сожалению, конструкция МЛК предполагает необходимость строительства объекта длиной около 20 км и, как ожидается, стоимость его составит более \$10 млрд —



Ученый проводит испытания прототипа плазменного ускорителя на Установке для испытаний перспективных ускорителей (FACET) Национальной ускорительной лаборатории SLAC в Калифорнии

цена настолько высока, что ни одна страна пока не взяла на себя обязательство разместить его на своей территории.

Между тем есть планы повысить энергию БАК до 27 ТэВ в существующем туннеле за счет увеличения силы сверхпроводящих магнитов, используемых для изгиба траектории протонов. Помимо этого, CERN предлагает кольцевой электрон-позитронный и протон-протонный коллайдер с длиной окружности 100 км, получивший название «Будущий кольцевой коллайдер» (*Future Circular Collider*). Такая машина позволила бы достичь беспрецедентной энергии 100 ТэВ в протон-протонных столкновениях. Однако стоимость этого проекта, вероятно, будет такой же, как у МЛК, или еще больше. Даже если этот коллайдер и будет построен, эксперименты на нем не смогут начаться до тех пор, пока после 2035 г. БАК не завершит работу.

Но эти гигантские и дорогие машины — не единственно возможный вариант. С 1980-х гг. физики разрабатывают альтернативные концепции коллайдеров. Среди них одна, получившая название «плазменный

(кильватерный) ускоритель», открывает широкие перспективы для создания коллайдера ТэВ-масштаба, более компактного и намного более дешевого, чем машины, базирующиеся на существующих методах.

Зоопарк элементарных частиц

История ускорителей элементарных частиц началась в 1897 г. в физической Кавендишской лаборатории Кембриджского университета. Там Джозеф Джон Томсон создал самую первую версию ускорителя элементарных частиц, воспользовавшись катодной трубкой, прообразом тех, которые впоследствии использовались в большинстве телевизоров до появления плоских экранов. Он открыл отрицательно заряженную частицу — электрон.

Вскоре физики установили две другие составляющие атома — протон и нейтрон, используя радиоактивные частицы в качестве снарядов для бомбардировки атомов. А в 1930-х гг. появился первый циклический ускоритель частиц — изобретенное Эрнестом Лоуренсом устройство размером с ладонь, получившее название «циклотрон»

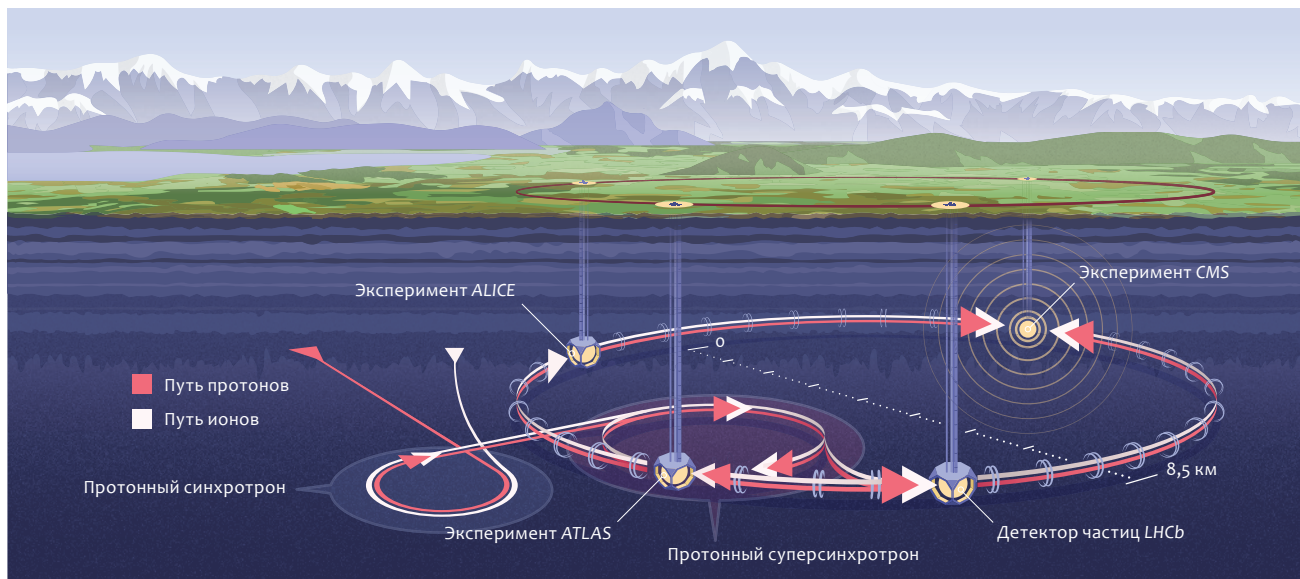
Следующее поколение ускорителей

В большинстве ускорителей частиц, построенных на текущий момент, для генерирования электрических полей используется радио- или СВЧ-излучение, которое ускоряет заряженные частицы, чтобы затем столкнуть их друг с другом, вызвав всплеск энергии, который может породить новые частицы. Совершенная машина такого типа — Большой адронный коллайдер CERN. А некоторые физики уже предложили устройство, которое

придет ему на смену, получившее название «Международный линейный коллайдер». Однако реализация этих грандиозных планов может оказаться непомерно дорогостоящей затеей. Чтобы достичь уровня энергии, необходимого для новых открытий, ученым, возможно, придется обратиться к экзотической технике, например к концепции, называемой плазменным кильватерным ускорением.

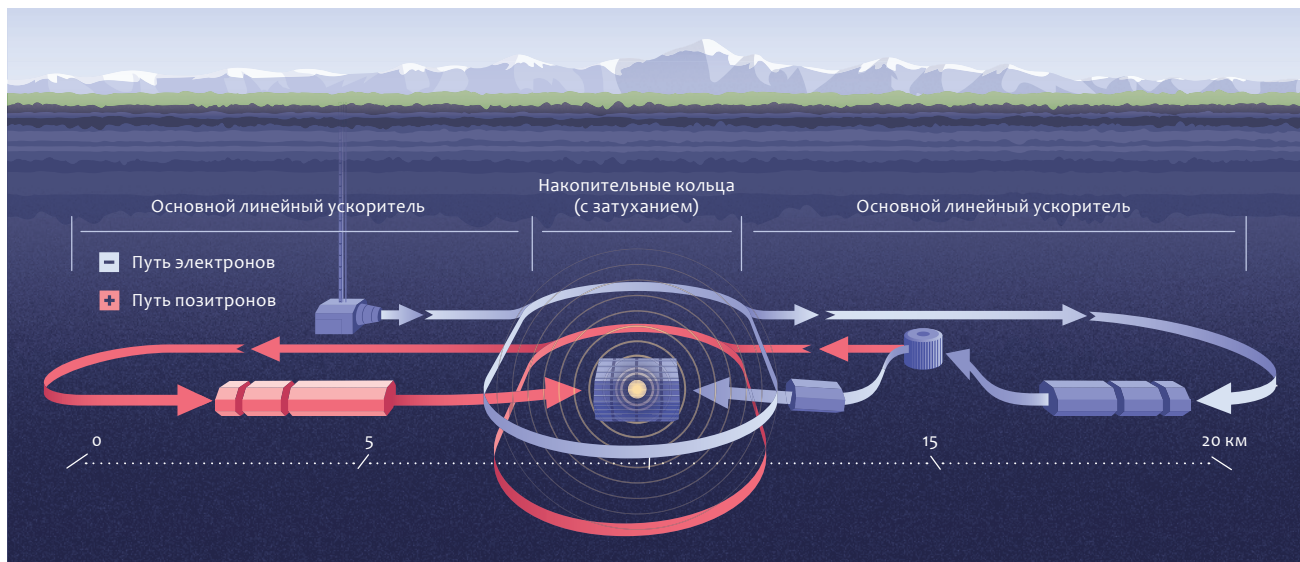
Нынешний лидер: Большой адронный коллайдер (БАК)

Это 27-километровое кольцо — самый большой и мощный из когда-либо построенных ускорителей элементарных частиц, в котором сталкиваются протоны с энергией до 14 трлн эВ (ТэВ). На расположенной под землей недалеко от Женевы машине стоимостью \$4,75 млрд ведутся четыре экспериментальных исследования в разных точках столкновения. Главным достижением БАК стало открытие в 2012 г. бозона Хиггса. Чтобы сделать возможными дальнейшие открытия, некоторые ученые хотели бы повысить энергию БАК до 27 ТэВ, увеличив силу поля его сверхпроводящих магнитов.

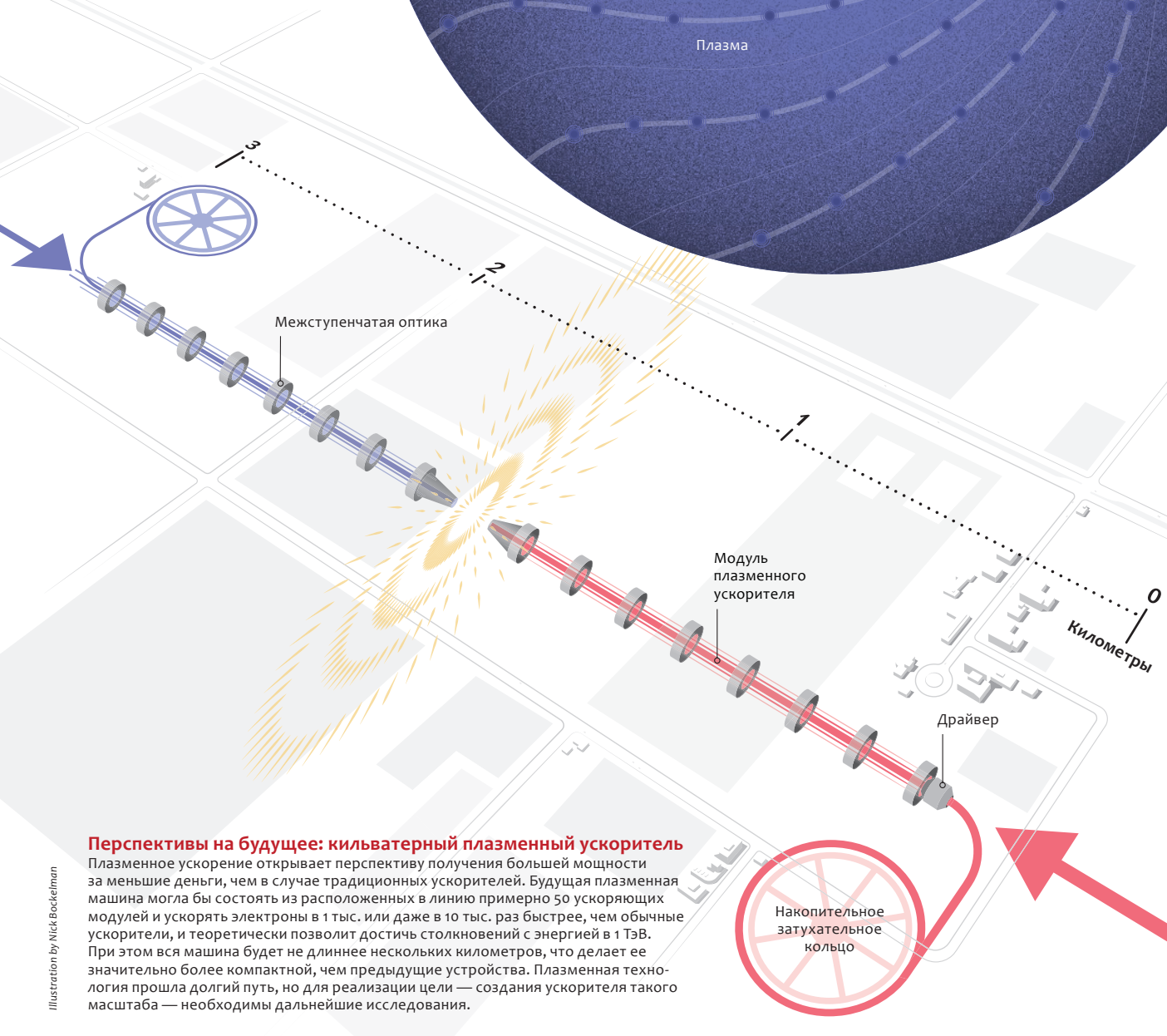
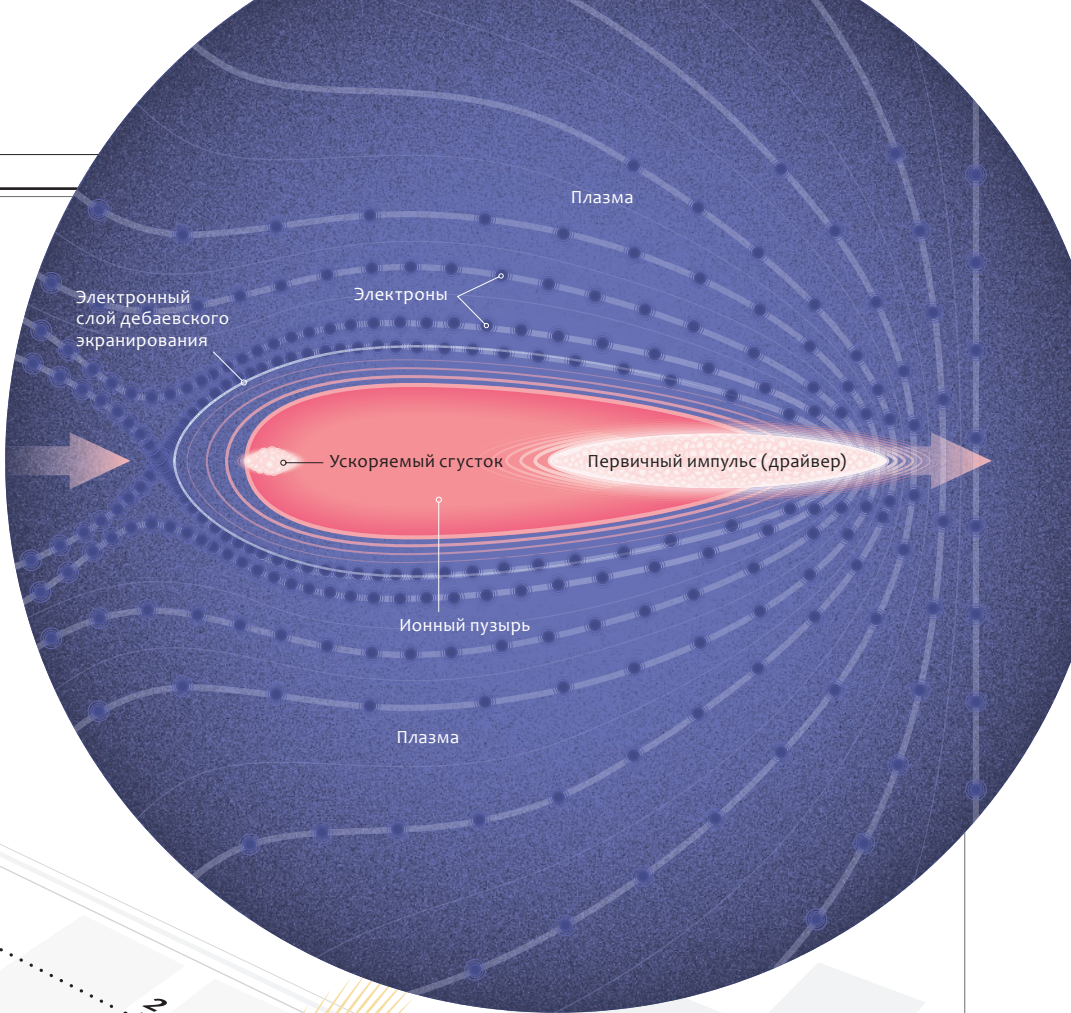


На подходе: Международный линейный коллайдер (МЛК)

Предлагаемый линейный ускоритель будет сталкивать электроны с их двойниками из антиматерии — позитронами. 20-километровая машина будет разгонять частицы до более низкой энергии (250 ГэВ), чем БАК, но позволит получить более четкие данные. Однако стоимость его оценивается примерно в \$10 млрд, и на сегодня ни одна из стран не согласна принять его у себя.



Когда начальный импульс лазера или пучок электронов — «драйвер» — проходит через плазму, он выталкивает электроны плазмы наружу. Когда драйвер продолжает движение, плазма, испытывающая теперь дефицит электронов, заряжается положительно и притягивает вытесненные электроны к себе назад. Когда электроны устремляются к оси, они по инерции пролетают мимо, а затем электростатические силы снова тянут их назад, что создает в кильватерном следе осциллирующее электрическое поле. Теперь, когда второй «ускоряемый» сгусток электронов летит через плазму, электрическое поле его ускоряет.

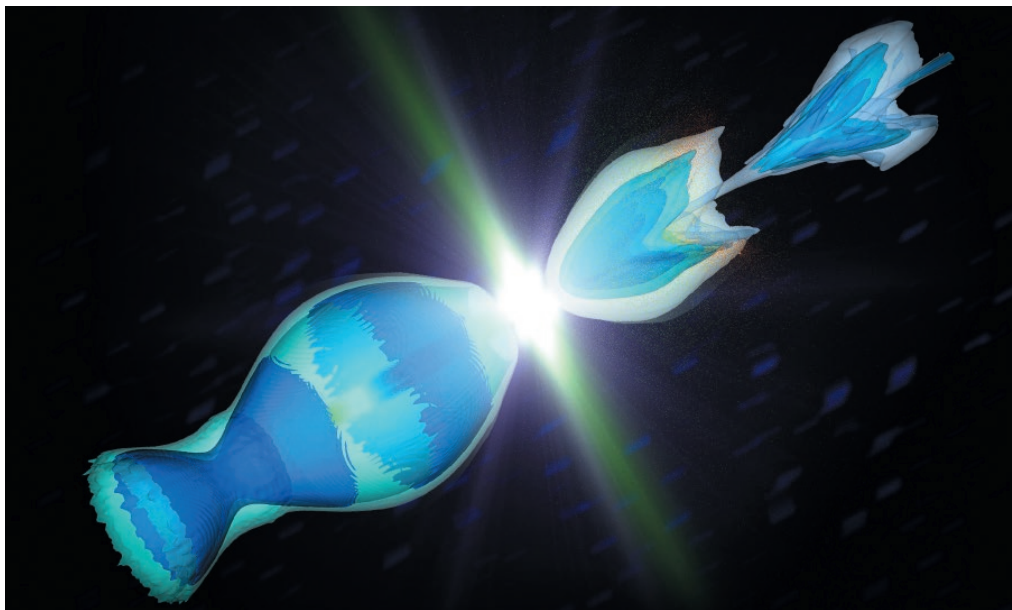


Перспективы на будущее: кильватерный плазменный ускоритель

Плазменное ускорение открывает перспективу получения большей мощности за меньшие деньги, чем в случае традиционных ускорителей. Будущая плазменная машина могла бы состоять из расположенных в линию примерно 50 ускоряющих модулей и ускорять электроны в 1 тыс. или даже в 10 тыс. раз быстрее, чем обычные ускорители, и теоретически позволит достичь столкновений с энергией в 1 ТэВ. При этом вся машина будет не длиннее нескольких километров, что делает ее значительно более компактной, чем предыдущие устройства. Плазменная технология прошла долгий путь, но для реализации цели — создания ускорителя такого масштаба — необходимы дальнейшие исследования.

Illustration by Nick Beckelmann

Компьютерное моделирование перспективной схемы ускорителя: сталкиваются ускоренные плазмой электроны и позитроны



и способное ускорять протоны примерно до 80 кэВ. После этого техника ускорителей стремительно развивалась и ученые смогли увеличить энергию заряженных частиц в ускорителе до величины, позволяющей исследовать атомное ядро. Этот прогресс привел к открытию «зоопарка» из сотен субъядерных частиц, что положило начало эре физики высоких энергий, базирующейся на ускорителях. После того как в последней четверти прошлого века энергия пучков в ускорителях быстро выросла, было показано, что частицы этого зоопарка состоят всего из 17 элементарных частиц, предсказанных Стандартной моделью. Все они, кроме бозона Хиггса, были открыты в экспериментах на ускорителях к концу 1990-х гг. Возможное явление бозона Хиггса ученым на БАК сделало Стандартную модель венцом современной физики элементарных частиц.

Помимо того что ускорители — один из самых успешных инструментов научных открытий в истории, они нашли множество применений в медицине и в нашей повседневной жизни. Они используются в компьютерных томографах, для рентгена костей и для лучевой терапии злокачественных опухолей. Они жизненно важны для стерилизации пищевых продуктов и для производства радиоактивных изотопов для несметного числа медицинских тестов и методов лечения. Они служат основой рентгеновских лазеров на свободных электронах, которые используются тысячами ученых и инженеров для проведения передовых исследований в области физических, медицинских и биологических наук.

Основы ускорителя

Ускорители бывают двух типов: кольцевые (синхротронные) и линейные. Все они питаются СВЧ-излучением или излучением в диапазоне радиоволн, которое может ускорять частицы почти до скорости света. Например, в Большом адронном коллайдере два протонных пучка, бегущие в противоположных направлениях, многократно проходят через расположенные вдоль кольца участки так называемых радиочастотных полостей. Электромагнитные волны внутри этих полостей создают [переменные] электрические поля, частота которых подбирается таким образом, чтобы на положительно заряженный протон всегда действовала сила, направленная вперед по его движению. Эта сила ускоряет протоны и сообщает им [дополнительную] энергию. Как только частицы набирают достаточную энергию, магнитные линзы очень точно фокусируют пучки протонов в нескольких точках, расположенных вдоль кольца, где и происходят столкновения. При столкновении на таких скоростях образуется чрезвычайно высокая плотность энергии, что приводит к рождению новых частиц большей массы.

Однако когда заряженные частицы летят по дуге окружности, они излучают «синхротронное излучение». При любом данном радиусе кольца для более тяжелых частиц, таких как протоны, эта потеря энергии существенно меньше, поэтому БАК — протонный коллайдер. Но в случае электронов потери слишком велики, особенно когда их энергия растет, поэтому ускорители будущего, на которых предполагается сталкивать

электроны и позитроны, должны быть либо линейными коллайдерами, либо иметь очень большой радиус, то есть меньшую кривизну, что снижает мощность излучения, испускаемого электронами.

Размер ускорительного комплекса для данной энергии пучка в конечном итоге зависит от того, сколько высокочастотной мощности можно закачать в ускоряющую структуру до того, как в ней случится электрический пробой. В традиционных ускорителях для создания этой ускоряющей структуры использовалась медь и порог пробоя ограничивал максимальную энергию, которую можно добавить на дистанции в 1 м, величиной от 20 до 50 млн эВ (МэВ). Ученые, разрабатывавшие ускорители, экспериментировали с новыми типами ускоряющих структур, которые работают на более высоких частотах, что позволило увеличить порог электрического пробоя. Они работали также над увеличением силы ускоряющих полей в сверхпроводящих полостях, которые теперь повсеместно используются как в синхротронах, так и в линейных ускорителях. Эти усовершенствования очень важны и почти наверняка будут реализованы до того, как какие-нибудь новые, коренным образом меняющие основные принципы концепции отправят на металллом успешную технику традиционных ускорителей.

В конечном итоге, возможно, потребуются другие стратегии. В 1982 г. в рамках программы физики высоких энергий Министерства энергетики США стартовала скромная инициатива по исследованию совершенно новых методов ускорения заряженных частиц. Эта программа породила множество идей; три из них выглядят особенно многообещающими.

Первая — двухпучковый ускоритель. В этой схеме относительно медленный высокозарядный пучок электронов используется для генерации высокочастотного излучения в полости, а затем это излучение ускоряет параллельный электронный пучок во второй полости. Эта концепция проходит испытания в *CERN* на машине под названием «Компактный линейный коллайдер» (*CLIC*).

Другая идея: столкнуть гораздо более тяжелых родственников электронов — мюоны. Большая масса мюонов означает, что их можно ускорять в кольце, не теряя столько энергии на синхротронное излучение, сколько теряется при ускорении электронов. Существенный недостаток этой идеи в том, что мюоны — нестабильные частицы,

время жизни которых составляет две миллионные доли секунды. Они образуются при распаде частиц, называемых пионами, для получения которых необходимо направить интенсивный пучок протонов на специальную мишень. Никто еще никогда не строил мюонные ускорители, но среди ученых, занимающихся ускорителями, есть убежденные сторонники этой идеи.

И, наконец, третья идея: плазменное, или кильватерное, ускорение. Его концепция возникла в 1970-х гг. у Джона Доусона (John M. Dawson) из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, который предложил использовать плазменный след, создаваемый интенсивным лазерным импульсом или пучком электронов, для ускорения второго пучка частиц в 1 тыс. или даже в 10 тыс. раз быстрее, чем в обычных ускорителях. Эта концепция получила название плазменного (кильватерного) ускорителя. Она вызвала большой ажиотаж, высветив перспективу миниатюризации этих гигантских машин, во многом подобно тому, как интегральные схемы миниатюризировали электронику с начала 1960-х гг.

Четвертое состояние вещества

Большинство людей знакомы с тремя состояниями вещества: твердое, жидкое и газообразное. Плазму часто называют четвертым состоянием вещества. Хотя она достаточно редко встречается в нашей повседневной жизни, это наиболее распространенное состояние вещества во Вселенной. По некоторым оценкам, более 99% всего видимого вещества в космосе находится в состоянии плазмы — так, например, из плазмы состоят звезды. Плазма — это, по сути, ионизированный газ с одинаковой плотностью электронов и ионов. Ученые могут легко получать плазму в лабораторных условиях, пропуская электричество через газ, как это происходит в обычной люминесцентной лампе.

Плазменный ускоритель с кильватерным полем использует что-то вроде следа, оставляемого моторной лодкой или реактивным самолетом. Когда лодка движется вперед, она расталкивает воду, которая движется в противоположном от лодки направлении, оставляя позади лодки след. Точно так же хорошо сфокусированный лазерный импульс огромной интенсивности, движущийся через плазму со скоростью света, может генерировать релятивистский след (то есть след, также распространяющийся почти со скоростью света), оказывая

радиационное давление и смещая электроны плазмы со своего пути. Если вместо лазерного импульса через плазму направить сильнооточный пучок электронов высокой энергии, электростатические силы отталкивания отрицательного заряда этих электронов могут вытеснить все электроны плазмы. Положительно заряженные более тяжелые ионы плазмы остаются на месте. После прохождения импульса ионы притягивают обратно вытесненные электроны, воздействуя электростатической силой между своими положительными зарядами и отрицательными зарядами электронов. Электроны движутся так быстро, что обгоняют ионы, а затем снова испытывают притяжение в обратном направлении, что создает осциллирующий кильватерный след. Из-за пространственного разделения в плазме электронов и ионов внутри этого следа возникает электрическое поле.

Конечная цель ученых, занимающихся плазменными ускорителями, — реализовать линейный ускоритель, в котором сталкивались бы хорошо сфокусированные пучки электронов и позитронов или два пучка электронов общей энергией более 1 ТэВ. Чтобы добиться этого, потребуется последовательно соединить примерно 50 отдельных плазменных ускорительных ступеней

Если второй «ускоряемый» сгусток электронов следует непосредственно за первичным («драйвером»), электроны в ускоряемом сгустке могут получать энергию из кильватерного следа наподобие того, как сгусток электронов ускоряется электромагнитной волной в обычном ускорителе.

Если в ускоряемом сгустке достаточное количество электронов, они могут поглощать из следа достаточно энергии, чтобы ослабить электрическое поле. Теперь на все

электроны в этом сгустке действует постоянное ускоряющее поле и они с одинаковой скоростью набирают энергию, тем самым уменьшается разброс энергии электронов в сгустке.

Основное преимущество плазменного ускорителя перед другими схемами состоит в том, что электрические поля в плазменном кильватерном следе могут быть в 1 тыс. раз сильнее, чем в традиционных радиочастотных полостях. К тому же значительная доля энергии, передаваемой лучом-драйвером в кильватерный след, может быть извлечена ускоряемым пучком. Эти эффекты делают коллайдер на основе плазменного кильватерного поля потенциально более компактным и более дешевым, чем обычный.

Будущее плазмы

За последние два десятилетия плазменные кильватерные ускорители с лазерной и электронной накачкой совершили огромный шаг вперед. Моя собственная группа в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе провела эксперименты на нашем прототипе совместно с физиками Национальной ускорительной лаборатории SLAC (SLAC — Центр Стэнфордского линейного ускорителя), используя их Установку для испытаний перспективных ускорителей (FACET) в Менло-Парке, штат Калифорния. Мы инжестрировали первичный и ускоряемый сгустки электронов с начальной энергией 20 ГэВ и обнаружили, что энергия ускоряемых электронов увеличивается на величину до 9 ГэВ после прохождения через плазму на отрезке длиной 1,3 м. В эксперименте по проверке концепции, используя плазму, мы также достигли усиления 4 ГэВ в сгустке позитронов на отрезке длиной всего 1 м. Несколько других лабораторий по всему миру, используя в качестве драйвера излучение лазера, получили для сгустков электронов усиление энергии в несколько ГэВ.

Конечная цель ученых, занимающихся плазменными ускорителями, — реализовать линейный ускоритель, в котором сталкивались бы хорошо сфокусированные пучки электронов и позитронов или два пучка электронов общей энергией более 1 ТэВ. Чтобы добиться этого, нам, вероятно, потребуется последовательно соединить примерно 50 отдельных плазменных ускорительных ступеней, при этом в каждой из них энергия пучка будет увеличиваться на 10 ГэВ.

Однако обеспечение соосности и синхронизации первичного и ускоряемого пучков

при прохождении через такое количество ступеней плазменного ускорителя, необходимое, чтобы столкнуть два пучка с требуемой точностью, вырастает в огромную проблему. Типичный радиус кильватерного следа — менее 1 мм, а ученые должны ввести ускоряемый сгусток электронов с субмикронной точностью. Необходимо синхронизировать временные параметры первичного импульса и ускоряемого пучка с точностью не хуже одной стотриллионной доли секунды. Любое отклонение от оси может привести к ухудшению качества пучка и потере энергии, а также заряда, вызванного осцилляцией электронов в окрестности оси кильватерного следа в плазме. Эта потеря проявляется в виде жесткого рентгеновского излучения, называемого бетатронным излучением, и накладывает ограничение на то, сколько энергии можно получить от плазменного ускорителя.

Существуют и другие технические препятствия, которые не позволяют немедленно превратить эту идею в коллайдер. Возьмем основной показатель качества коллайдера — светимость. Попросту говоря, это мера того, сколько частиц сможет пролететь через данную площадку за данное время. Светимость, умноженная на сечение, или вероятность столкновения двух частиц, говорит вам, сколько столкновений определенного вида в секунду вы, вероятно, будете наблюдать. Желаемая светимость для линейного электрон-позитронного коллайдера с энергией 1 ТэВ составляет $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Для достижения такой светимости требуется, чтобы встречные пучки имели среднюю мощность 20 МВт каждый — 10^{10} частиц в сгустке при частоте повторения 10 кГц и размере пучка в точке столкновения в десятки миллиардных долей метра. Чтобы проиллюстрировать, насколько это сложно, давайте рассмотрим среднюю потребляемую мощность. Даже если бы можно было передавать энергию от первичного пучка к ускоряющемуся с 50-процентной эффективностью, в двух тонких трубках плазмы останется 20 МВт мощности. В идеальном случае мы могли бы частично восстановить эту мощность, но это отнюдь не тривиальная задача.

Хотя ученые добились значительного прогресса в технике для электронного плеча плазменного линейного коллайдера, ускорение позитронов все еще находится в младенческом состоянии. Вероятно, потребуется еще десятилетие скоординированных фундаментальных научных исследований,

чтобы довести ускорители позитронов до такого же уровня, которого мы достигли в работе с электронами. В качестве альтернативного варианта мы могли бы сталкивать электроны с электронами или даже с протонами, где одно или оба электронных плеча базируются на плазменном кильватерном ускорении. Другая концепция, которую изучают ученые в *CERN*, — попытка модулировать протонный сгусток многосантиметровой длины, направив его через столб плазмы и используя сопровождающий его плазменный след для ускорения электронного сгустка.

Будущее плазменных ускорителей неясно, но заманчиво. Вполне возможно, что не пройдет и десяти лет, как мы научимся строить настольные плазменные ускорители на 10 ГэВ для различных научных и коммерческих приложений, используя существующие лазерные и электронно-лучевые устройства. Но путь от этих достижений до реализации линейного плазменного коллайдера, способного служить инструментом для новых открытий физики, все еще далек. Несмотря на то что мы добились впечатляющего прогресса в экспериментальных исследованиях плазменных ускорителей, параметры пучка, достигнутые на сегодня, еще далеки от того, что нам потребуется даже для электронного плеча будущего электрон-позитронного коллайдера, способного вести исследование на переднем крае физики элементарных частиц. Тем не менее, поскольку перспективы Международного линейного коллайдера и Будущего кольцевого коллайдера туманны, наилучшим вариантом для нас может быть дальнейшее совершенствование экзотической техники, которая сулит экономию в размерах и затратах. Разработка плазменной ускорительной техники — грандиозная научная и инженерная задача этого столетия, она предлагает исследователям огромное поле деятельности для риска, творчества, решения интереснейших проблем и заманчивую возможность открыть новые фундаментальные компоненты природы. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Джоши Ч. Плазменные ускорители // ВМН, № 5, 2006.

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

ДИОКСИД УГ В ГОРАХ О



ЛЕРОДА МАНА

Могут ли необычные
выходы глубинных пород
Земли решить мировую
климатическую проблему?

Дуглас Фокс

Мантийные породы гор, которые обычно лежат под землей на глубине многих километров, выходят в Омане на поверхность и взаимодействуют с воздухом, превращая углекислый газ в камень

ОБ АВТОРЕ

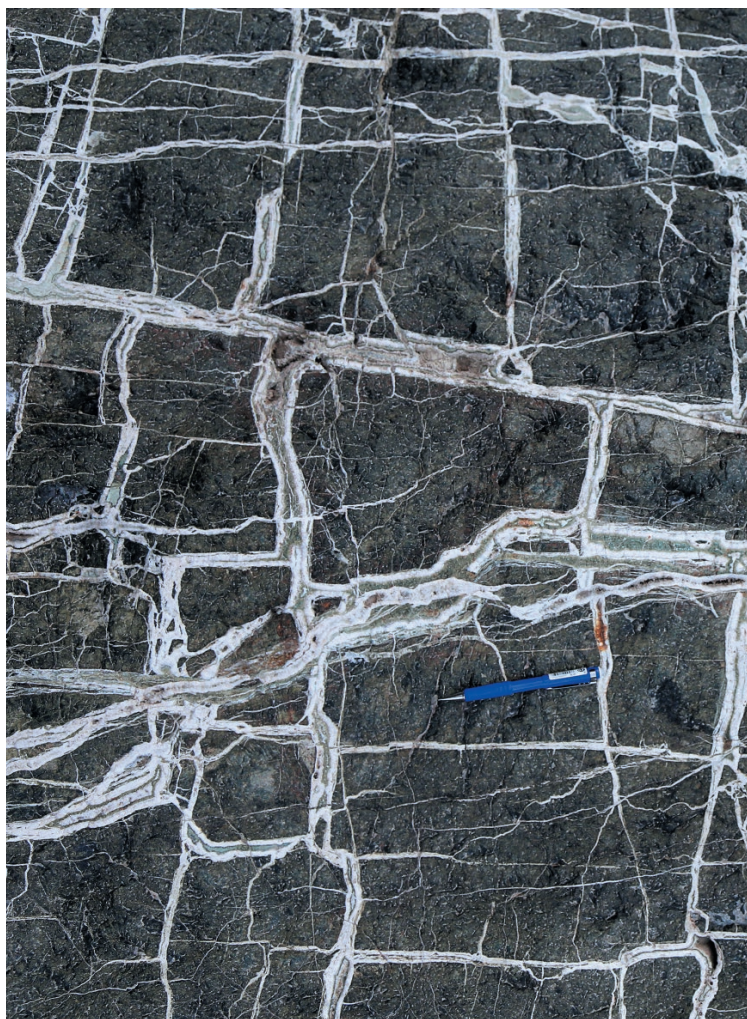
Дуглас Фокс (Douglas Fox) живет в Калифорнии, пишет статьи о климатологии, геологии и биологии. В прошлом году в нашем журнале была опубликована его статья «Ледяная эволюция» (ВМН, № 6, 2020) о крошечных существах, выживших в Антарктиде.



Вади-Лауэйни — удаленная пустынная долина в сердце гор Эль-Хаджар (или Оманских гор) на востоке от Саудовской Аравии. Путешественник попадает сюда по пустынной грунтовой дороге, переходящей в грубые отпечатки шин на гравийных наносах. Подземные воды в этом районе иногда выходят на поверхность в виде маленьких прудиков голубоватого оттенка, насыщенных щелочными солями, а иногда вода настолько полна газообразного водорода, что шипит, как шампанское, при подъеме из колодца.

Долина с редкими вкраплениями колючих кустарников обрамлена выветренными тусклыми коричневыми скалами, остроконечные вершины которых поднялись на сотни метров. Слагающая горная порода представляет собой необычное соединение минералов, которые химически неустойчивы на поверхности Земли. Она могла бы образоваться в десятках километров под земной поверхностью, внутри мантии — среднего слоя нашей планеты, который люди никогда не видели непосредственно, — намного глубже, чем любая нефтяная скважина или алмазная шахта. Порода была вытолкнута на поверхность в результате подвижек тектонических плит около 80 млн лет назад, и теперь, будучи открытой воздействию природных сил, она подвергается тлеющему геохимическому распаду с выделением газов.

Питер Келемен (Peter Kelemen) считает, что эта странная геологическая особенность могла бы помочь людям изменить ход климатической критической ситуации. Он развил эту концепцию однажды в январе 2018 г., когда мы сидели на раскладных стульях в Вади-Лауэйни в слабой тени чахлой акации. В сотне метров под навесом находилась временная полевая лаборатория со столами, химическими реактивами и специализированным сканером для изучения образцов горных пород. Келемен — геолог из Геофизической обсерватории Ламонта — Доэрти при Колумбийском университете. Сейчас ему 65 лет, седые волосы коротко подстрижены, а загорелая кожа свидетельствует о многолетней работе на воздухе. Плотные лепешки верблюжьего навоза валялись на гравии у наших ног. Келемен показал на каменную стену



позади нас, сформированную из коричневатой, выветрившейся породы мантии, называемой перидотитом. Когда дождевая вода просачивается через трещины в скалах, она приносит растворенные в воздухе кислород и углекислый газ. Вода и газы вступают в реакцию с горной породой, образуя прочные жилы новых минералов, которые, как корни деревьев, все глубже проникают в камень. Вся порода испещрена кремово-белыми прожилками. Келемен, указывая на одну, из карбоната магния, имеющую сантиметр в поперечнике, сказал: «Здесь примерно 50% углекислого газа». Когда я постучал по ней камешком, раздался стеклянный звон.

Келемен и его коллеги подсчитали, что обнаженные породы мантии в Омани поглощают и превращают в окаменелость до 100 тыс. т CO_2 ежегодно. Это примерно один грамм парникового газа на кубический метр твердой породы. По словам Келемена, если вы [увеличите] это в миллион раз, что можно осуществить, применив немного инженерной мысли, тогда вы получите 1 млрд т CO_2 на 1 км³ породы в год. А в Омани, обладающем примерно 15 тыс. км³ скальной породы, есть много

возможностей. План Келемена предусматривает ускорение естественных реакций путем бурения скважин на несколько километров вниз, туда, где породы горячее, и закачивания морской воды, насыщенной диоксидом углерода из воздуха.

Аналогичные выходы пород известны на земной поверхности в Аляске, Канаде, Калифорнии, Новой Зеландии, Японии и других местах. Келемен оценивает мировую емкость хранения в этих горных породах, включая Оман, в 60–600 трлн т CO_2 , что примерно в 25–250 раз превышает количество, которое человечество добавило в атмосферу с 1850 г. Келемен полагает, что использование этого каменного хранилища могло бы иметь огромное значение. В отчете Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) за 2019 г. сделан вывод о том, что глобальное потепление нельзя ограничивать 1,5° C — уровнем, который, как общепринято считать, позволит избежать катастрофических последствий, если люди каким-то образом удалят от 100 млрд до 1 трлн т двуокиси углерода из атмосферы к 2100 г. Если процесс запустить к 2050 г., это будет означать ежегодное сокращение выбросов CO_2 от 2 до 20 млрд т.

Чтобы претворить этот замысел в жизнь, человечеству следует построить обширную глобальную техническую инфраструктуру для извлечения CO_2 из атмосферы и закачивания его в скважины, пробуренные в породах мантии, — своего рода зеркальное отображение инфраструктуры, которая в настоящее время служит добыче ископаемого топлива, которое при сгорании дает приток углекислого газа в воздух. Келемен видит в Омани оживленный центр этой огромной новой отрасли.

Сработает ли эта контринфраструктура, будет зависеть от исследований, развернувшихся в Омани. Пока мы болтали под деревом, команда ученых Келемена готовилась пробурить дно Вади-Лауэйни и извлечь 400-метровый керн породы, чтобы изучить химические реакции, происходящие у нас под ногами. В отдалении, готовясь к бурению, прогрозотал экскаватор, выкапывавший яму.

Полученные тогда результаты, опубликованные в 2019 и 2020 гг., дали четкое направление, как людям усовершенствовать реакции. Согласно расписанию, в конце мая текущего года новая команда должна была прибыть в Вади-Лауэйни для проведения первого в мире испытания закачки и связывания диоксида углерода глубоко в породах мантии. Если этот эксперимент увенчается успехом, он может стать первым шагом к преобразованию Омани или даже всего Аравийского полуострова в крупный промышленный центр по управлению чрезвычайной климатической ситуацией.

Темный перидотит широко распространен среди пород мантии. Он реагирует с углекислым газом воздуха, растворенным в просачивающейся по трещинам дождевой воде, образуя белые прожилки карбонатов.





Быстрые реакции

Ученые на протяжении десятилетий обсуждали компенсацию выбросов парниковых газов путем улавливания переносимого воздухом CO_2 и закачки его в землю. И все больше исследований показывают, что необходимость в таких «отрицательных выбросах углекислого газа» стала насущной. Ученые предлагали разные стратегии. Так, посадки лесов или удобрение океана увеличат соответственно рост деревьев или фитопланктона, которые естественным образом поглощают диоксид углерода в процессе фотосинтеза. Улучшенное землепользование позволит большему количеству CO_2 , поглощаемого сельхозкультурами, оставаться в почве после сбора урожая. С помощью оборудования для улавливания углерода можно было бы фильтровать CO_2 из дымовых труб электростанций или заводов, а тысячи устройств прямого захвата воздуха по всему миру могли бы извлекать его из атмосферы днем и ночью.

Удаленный углекислый газ должен быть надолго герметически закупорен. На газовом месторождении Слейпнир у побережья Норвегии CO_2 , который поднимается попутно с природным газом, закачивается обратно в осадочные породы — грубые зернистые отложения, такие как песчаник, в бассейне на километр ниже морского дна. В рамках проекта, начатого в 1996 г., закачивается на хранение около 1 млн т CO_2 в год. Проблема с подобными операциями заключается в том, что двуокись углерода практически не вступает в реакцию с осадочными породами. В основном газ просачивается сквозь поры породы, и это вызывает у некоторых



ученых опасение, что он таким же образом может постепенно утекать обратно.

В 1990-е гг. Келемен занимался другим направлением научных исследований, проводя несколько недель в удаленных долинах Омана, называемых «вади», и нанося на карту окаменелые жерла, по которым когда-то поднималась магма из более глубоких и горячих слоев мантии на поверхность, где она застывала, образуя породу, известную как базальт, — твердый, плотный, темный камень,



Буровая установка медленно вгрызается в породы мантии (слева), высверливая цилиндрический стержень. Исследователи выкладывают секции сверху вниз (справа), чтобы понять, насколько глубоко проникает вода и сколько CO_2 перешло в минералы.

из форм карбоната кальция. Келемен заметил, что когда кальцитовая пленка разрушалась ветром или дождем, в течение 24 часов она заменялась новой. «Для геолога то, что происходит за сутки, — это сверхзвуковая скорость», — поясняет он.

Столь быстрая реакция на поверхности заставила Келемена задуматься, могли ли жилы также образовываться под землей быстрее, чем считалось. Когда он снова поехал в Оман в 2007 г., он и его ученики собрали крупные куски карбонатных жил. Вернувшись домой, они определили возраст минералов. «Я думал, этим жилам 90 млн лет, — признается Келемен, — а им всем было меньше 50 тыс. лет». Некоторым было всего 6 тыс. лет. Мантийные породы Омана не просто поглощали CO_2 в далеком прошлом; они все еще делают это сей-

час, возможно, в 10 тыс. раз быстрее, чем предполагал Келемен. Во время другой поездки в 2008 г. Келемен и Маттер подсчитали, что эти минералы составляют около 1% объема породы у земной поверхности. Это может означать, что во всем районе естественным образом происходит отверждение от 10 тыс. до 100 тыс. т CO_2 в год, что примерно эквивалентно годовым выбросам от 2 тыс. до 20 тыс. американских автомобилей. Эта суммарная величина не повлияет на изменение климата значительно, но заставляет задуматься о том, смогут ли люди ускорить процесс настолько, чтобы изменить ситуацию во всем мире.

Каждый год в течение следующих четырех лет оба исследователя возвращались в Оман. Они брали пробы воды из колодцев, чтобы отслеживать химические реакции, происходящие при ее движении под землей. Результаты показали, что по мере того как дождь проникает в трещины грунта, растворенный в дождевой воде CO_2 соединяется с атомами магния, образуя прожилки карбоната магния, пока небольшое количество газа быстро не унесется водой. Между тем кальций из той же самой мантийной перидотитовой породы растворяется и накапливается в воде по мере ее миграции. Они думали, что эта богатая кальцием вода в итоге снова появится в источниках, таких как в Хафифе. В результате реагирования с углекислым газом из воздуха образуются кальцитовые пленки, которые видел Келемен, а также обширные ступенчатые террасы из травертина, горной породы на основе кальцита, которые распространены повсюду в регионе.

Мантийные перидотиты Омана содержат большое количество магния и кальция в составе двух наиболее распространенных минералов: оливина и пироксена. Карбонатные жилы пронизывают породы, что указывает на то, что в прошлом они явно поглощали углекислый газ. Однако некоторые исследователи полагали, что это происходило в течение миллионов лет. Келемен никогда серьезно не задумывался об утилизации углерода, но в то же время скептически относился к медленным реакциям. Во время работы в Омане он часто проходил мимо щелочного источника в долине, называемой Хафифа, где вода, бьющая из-под земли, была настолько насыщена кальцием, что постоянно вступала в реакцию с CO_2 из воздуха, образуя на поверхности бассейнов ровный, зернистый, тонкий, как лист бумаги, слой минерала кальцита — одной

Келемен и Маттер все еще не знали, насколько люди могут ускорить этот процесс. Это должно зависеть от того, насколько быстро и глубоко циркулирует вода. А чтобы ответить на этот вопрос, им нужно было увидеть, что происходит под поверхностью Земли.

Глубинные воды

В январе 2018 г. теплым безоблачным днем я наблюдал, как Келемен и Маттер решительно заглянули внутрь скал Вади-Лауэйни. Восемь верблюдов, жующих кустарники, не обращали никакого внимания на скрежет размалывающего породу бура, установленного на задней части громоздкой рабочей камеры, поворачивающейся по мере вращения в дно долины.

Из скважины уже были подняты 9 м колонки породы. Основные секции, каждая около 2 м в длину и шириной с бейсбольную битку, были разложены по порядку на складных столах, и их изучали с полдюжины ученых. «На первых нескольких метрах много воздействий», — отметил Келемен, целеустремленно переходя от стола к столу. Цвет породы заметно менялся даже при таких относительно небольших изменениях глубины.

Оставаясь глубоко в мантии, породы были бы темно-зелеными из-за богатых магнием и кальцием минералов оливина и пироксена, образовавшихся при температурах выше 1300° С при полном отсутствии кислорода, воды и CO_2 . Но в результате тектонических движений и эрозии поднятые на поверхность породы подверглись цепи химических реакций. Верхние несколько метров скальной породы были окрашены в оранжевые тона, показывая, что в ближайших к поверхности слоях кислород, переносимый водой, связался с железом минералов и появилась ржавчина.

На несколько метров ниже эти цвета исчезли, означая, что растворенный кислород истощился в воде, просочившейся на данную глубину. У этой отметки серая порода была покрыта бесчисленными тонкими, как волосок, прожилками бирюзового цвета — минералом серпентином, который образуется при присоединении молекул воды к атомам магния и железа. (Еще один продукт процесса — газообразный водород, который выделяется из грунтовых вод.)

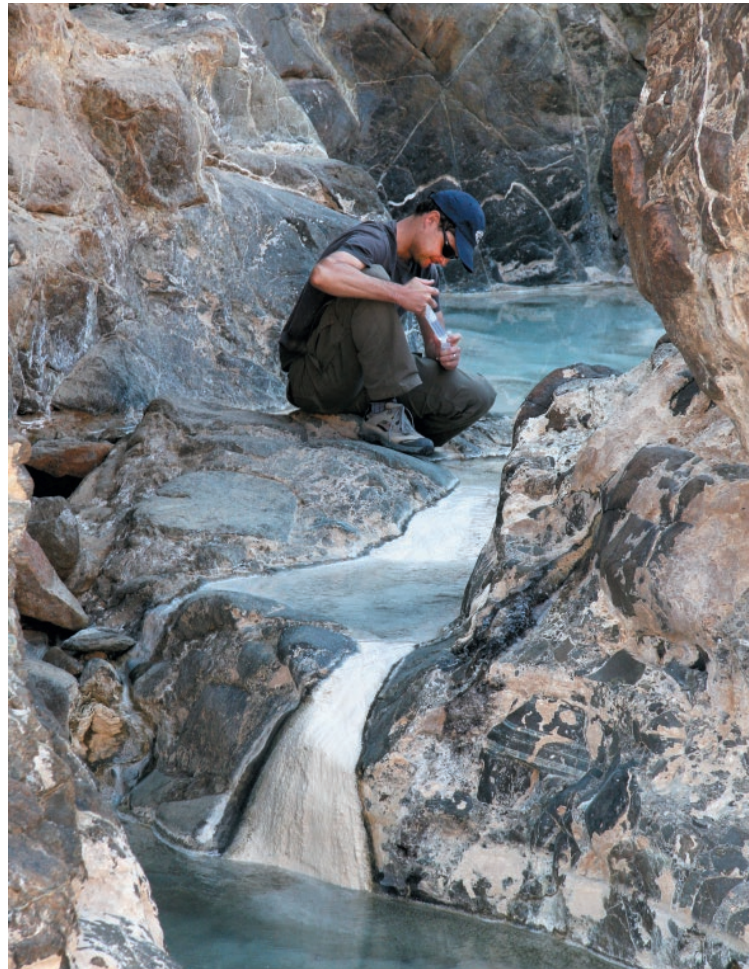
Наблюдалось также скрещение белых карбонатных прожилков, которые возникли в результате связывания CO_2 с магнием и кальцием. Эти извилины сначала имели примерно ширину пальца, но на 10 м ниже они становились редкими и тонкими, свидетельствуя о том, что вода также потеряла свой CO_2 , просачиваясь вниз.

Пока шло бурение, все дни рабочие упаковывали керны в ящики, чтобы освободить место для десятков новых сегментов, которые заполняли столы, создавая вид настоящего блошиного рынка

каменных цилиндров. Породы с глубины 400 м все еще были пронизаны тонкими жилками серпентина, подтверждая просачивание воды по крайней мере на эту глубину.

В течение следующих трех лет ученые проводили в лабораториях анализы с целью определения, насколько быстро горные породы реагировали с диоксидом углерода и водой. В 2020 г. и в начале 2021 г. я несколько раз беседовал с Маттером. Его поразила одна закономерность, наблюдаемая во всех кернах: «Вы не найдете абсолютно никаких карбонатов в жилах или трещинах на глубине ниже 100 м», — сказал он. По какой-то причине CO_2 не проникал в породы глубже.

В последнем аналитическом обзоре, опубликованном исследовательской группой, дано объяснение, почему это может быть. В статье 2019 г. Келемен и его коллеги, включая Маттера и его бывшую студентку Амелию Паукерт Ванкерен (Amelia Paukert Vankeuren), которая сейчас работает в Калифорнийском государственном университете в Сакраменто, подсчитали, что грунтовые воды на уровне верхних 50 м скважин формировались за счет протекающих сюда дождевых осадков в течение 4–40 лет. Но вода в породах под ними





Юрг Маттер (слева) изучает грунтовые воды, настолько насыщенные кальцием, что они вступают в реакцию с CO_2 из воздуха, образуя жемчужно-белые пленки кальцита на поверхности (вверху). Кальцит также может накапливаться на поверхности горных пород.

находилась под землей не менее 20 тыс. лет. В статье, опубликованной в 2020 г., Маттер и Жерар Лодс (G rard Lods), его соавтор из Университета Монпелье во Франции, измерили, насколько легко вода движется через породу при перекачке между двумя глубокими скважинами, расположенными на расстоянии 15 м друг от друга. Они выяснили, что вода относительно легко перемещалась на верхних отметках до 100 м, но ниже проницаемость упала в 1 тыс. раз.

Взятые вместе, эти наблюдения показывают, что скорость карбонизации минералов в Омани ограничена серьезным препятствием: дождевая вода просто не проникает глубже приблизительно 100 м. А мантийные породы Омани в среднем имеют толщину около 3 км. По мнению Маттера, это говорит об огромном потенциале карбонизации на больших глубинах, если вода каким-то образом может попасть туда и быстро циркулировать сквозь породы, чтобы обеспечить стабильный приток CO_2 .

Чтобы преодолеть это узкое место, установки прямого улавливания воздуха, снабженные вентиляторами, которые втягивают воздух через химические поглотители, могли бы удалять CO_2 из воздуха и сгущать его. Другие же установки могли бы под давлением отправлять этот газ в скважину. На глубине от 1 тыс. м до 3 тыс. м газ будет

смешиваться с водой (закачанной через отдельную трубу), и вода с растворенным диоксидом углерода будет изливаться в окружающие породы мантии. Вода просочится по порам породы и в конечном итоге достигнет второй скважины на расстоянии 1 тыс. м, которая будет действовать как вытяжная труба. Вода, обедненная CO_2 , поднимется обратно на поверхность, где снова может обогатиться газом.

Температура горных пород на глубине 3 км — примерно 100°C . Это тепло может ускорить реакции. Дополнительное тепло, производимое самими реакциями, может развить обратный ход вверх нагретой воды. В 2020 г. Келемен и Паукерт Ванкерен опубликовали расчеты, согласно которым перекачка

воды с умеренно повышенными концентрациями CO_2 вниз на 3 км может ускорить образование минералов во много тысяч раз. При такой скорости единственная закачная скважина могла бы улавливать до 50 тыс. т CO_2 в год — примерно такое же количество газа, которое поглощается естественным образом во всем Омани, причем на площади размером с девять футбольных полей. За десятилетие эта скважина могла удалить полмиллиона тонн двуокиси углерода.

Ученые, добывающие керны в Вади-Лауэйни, не пытались внедрить углекислый газ в породы мантии. Но несколькими годами ранее в Исландии исследователи постарались ввести CO_2 в другой тип породы, химически схожей с мантийной. Этот успешный проект заложил основу для того, что сейчас должно произойти в Омани.

Фактор гидравлического разрыва

На глубине сотен километров под Северным Атлантическим океаном между Гренландией и Норвегией в мантии находится источник повышенной тепловой энергии. Тепло, исходящее от ядра Земли, размягчает породу. Эта частично расплавленная магма плавно поднимается по трещинам ко дну океана. За 50 млн лет эта магма затвердела, превратившись в базальт, породу, зародившуюся

Большой порт

обслуживает Маскат, столицу Омана. Улавливание миллиардов тонн атмосферного CO_2 и его сжатие в воде, которая закачивается под землю, где идет его переход в минералы, потребует обширной промышленной инфраструктуры.



в мантии и ставшую одним из основных компонентов коры нашей планеты. Так базальтовое плато поднималось все выше и выше над дном океана, пока не вышло наружу, образовав современную Исландию. Серо-черная плотная порода усыпана мелкими пузырчатыми вкраплениями. Содержание магния и кальция в ней меньше, чем в ее материнской породе, но все же больше, чем в большинстве горных пород на поверхности Земли.

К 2005 г. Маттер, Лакнер и Уоллис Брокер (Wallace Broecker) из Геофизической обсерватории Ламонта — Доэрти убедились, что эти базальты предоставляют хорошую возможность для связывания CO_2 с образованием минералов. Брокер (умерший в 2019 г.) сотрудничал с *Reykjavik Energy* (независимый поставщик коммунальных услуг и электроэнергии. — Примеч. пер.), чтобы провести эксперимент по закачке диоксида углерода, называемый *Carbfix*, на исландской геотермальной электростанции Хеллискейди. Начиная с 2012 г. углекислый газ и сероводород, природные продукты геотермальных процессов, отделяли от выхлопных заводских газов и закачивали через скважины на 400–800 м в базальты.

За восемь месяцев электротехники закачали около 250 т CO_2 . Мониторинг близлежащих скважин показал, что в течение двух лет из них 95% было заключено в карбонаты. С тех пор проект действует, и ежегодно около 10 тыс. т CO_2 закачивается на хранение. В 2019 г. *Carbfix* была выделена как независимая компания с целью удаления 1 млрд т CO_2 в базальты к 2030 г.

Маттер, помогавший провести эксперимент, считает его результаты серьезным подтверждением эффективности метода. Как он поясняет,

вначале «общество ловцов углекислого газа считало нас сумасшедшими», потому что базальты считались недостаточно пористыми, чтобы в них могла циркулировать вода. С тех пор другая исследовательская группа из Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории в Ричленде, штат Вашингтон, также осуществила затвердевание CO_2 в базальтовых породах в рамках проекта экспериментального демонстрационного использования базальтов Валлулы (*Wallula Basalt Pilot Demonstration*).

Исследуемые породы мантии могут быть более эффективными, чем базальты, потому что они содержат в три раза больше химически активного магния и кальция. Одна тонна мантийного перидотита может закрепить до 500 кг CO_2 , и если сравнить с базальтом, то в этом случае примерно 170 кг газа приходится на 1 т породы.

Но не все думают, что упомянутые мантийные породы или даже базальты — идеальное решение. Кристофер Захаски (Christopher Zahasky) гидрогеолог из Висконсинского университета в Мадисоне, говорит, что даже закачанный в осадочные породы CO_2 хотя и может мигрировать, но его хранение остается по-прежнему безопасным, поскольку мощные капиллярные силы удерживают его в крошечных промежутках между зёрнами минералов. Даже если толщу породы пересекает трещина, утечка газа маловероятна.

Тем не менее Захаски по-прежнему видит важное преимущество хранения CO_2 в базальтах и мантийных породах. «Просто в этом случае проект легче продавать и объяснять людям», — говорит он, и это важное соображение, особенно если учитывать, что крупномасштабные проекты вряд ли

будут реализованы без серьезной общественной поддержки. А в некоторых регионах, таких как Оман, Индия и Тихоокеанский северо-запад США, базальтов или мантийных пород может быть больше, чем подходящих осадочных отложений. Чтобы решить проблему углекислого газа, отмечает Захаски, «нам действительно нужно бросить все силы на поиски решения».

Проблема с мантийными породами, по словам Захаски, заключается в том, что в них гораздо меньше порового пространства, чем в осадочных породах. «Нужно больше скважин, чтобы более равномерно распределять текучие смеси в недрах», — объясняет он. Келемен бьется над этой проблемой годы. Он считает, что решение кроется в том, что если закачка будет сделана правильно, то сами химические реакции помогут разрушить породу, позволяя воде двигаться свободно.

Когда я был в Омане, Келемен повел меня по узкой балке. Мы остановились возле округлого огромного камня, пронизанного карбонатными жилами. Каменные глыбы, которые когда-то были плотно сплетены друг с другом, теперь опрокинулись и были беспорядочно разбиты внедрившимися жилами, как разрушенное здание, в котором непропорционально разбух раствор между кирпичами. «Когда я смотрю на это обнажение, я почти слышу, как оно взрывается», — отметил Келемен.

Метафорический «взрыв» происходил в замедленном режиме, когда породы оставались еще под землей. Когда диоксид углерода соединяется с магнием или кальцием при образовании карбонатов, масса увеличивается. Новый материал занимает на 20–60% больше объема, чем предшествующие минералы. Согласно моделям, составленным Келеменом, эти минералы могут во время роста оказывать давление до 2,9 тыс. атм на окружающую породу, взламывая ее. Как утверждает Келемен, химическое преобразование мантийных пород должно естественным образом привести к их разрывам, в результате чего трещины будут становиться все глубже и шире, открывая новые поверхности для химических воздействий и позволяя протекать большему количеству воды и CO_2 .

Маттер и Роберт Зон (Robert Sohn), геофизик из Океанографического института в Вудс-Холе, вскрыли доказательство гидроразрыва во время двух поездок в Вади-Лауэйни в 2019 и 2020 гг. Они опустили гидроприемники давления в несколько заполненных водой скважин, оставшихся после бурения, и разместили вокруг них сейсмометры. В течение месяца они зарегистрировали сотни микроземлетрясений, которые были намного слабее, чем все, что может почувствовать человек. «Если имеются производимые химической реакцией разрывы, то за ними будут следовать очень характерные сигналы», — разъясняет Зон. Полученные данные, по его словам, «полны таких сигналов».

Он предупреждает, что результаты сопоставимы с разломами, вызванными химическими реакциями, но еще не служат их доказательством.

Даже если бы технические работники смогли постичь, как обуздать растяжение и разрыв в своих интересах, им пришлось бы учитывать непредвиденные последствия. По приблизительным оценкам, улавливание и удержание 1 млрд т CO_2 в карбонатах потенциально может увеличить объем породы до 0,1 км³, что равно примерно 35 башням Эмпайр-стейт-билдинг. Если подобное расширение затронуло бы породы, лежащие под землей на площади 300 км³, как в одном из сценариев Келемена, тогда преобразование в минералы 1 млрд т CO_2 в год, вероятно, могло бы вызвать подъем земной поверхности на 30 см в год.

Закачка же 1 млн т CO_2 в год на 300 км³ приведет поднятию грунта менее, чем на один миллиметр в год, — это меньше, чем то, что происходит естественным образом во многих областях ввиду действия тектонических сил. Расширение становится проблематичным только при действительно огромных масштабах закачки. Келемен считает, учитывая проблему, что любую закачку в размере гигатонн в Омане следует производить у берегов Оманского залива, где технологи могли бы пробурить по диагонали породы мантии, расположенные ниже мелководного морского дна. Любое поднятие, вероятно, может случиться на дне морском, где оно, скорее всего, будет безвредным. И приморский участок, очевидно, обеспечит обильную морскую воду для переноса концентрированного диоксида углерода, что важно в этой пустынной стране, где грунтовых вод обычно не хватает.

Ясно, что настало время ответить на вопросы, прежде чем мантийные породы начнут вносить изменения в выбросы углекислого газа. Пора приступить на опыте к ответам.

Завоевание берегов

Компания, базирующаяся в Омане, названная 44.01 (это средний молекулярный вес CO_2), получила одобрение правительства на проведение первого в мире пробного испытания карбонизации минералов в породах мантии. Компания должна была начать перевозку оборудования в Вади-Лауэйни в мае или июне 2021 г. Через несколько недель 44.01 приступит к закачке пресной воды, содержащей двуокись углерода и инертный химический индикатор, в скважину на небольшом расстоянии от той, что я наблюдал в 2018 г. Исследователи будут контролировать уровни индикатора, CO_2 и растворенных минералов во второй скважине на расстоянии около 100 м, чтобы определить, как быстро вода проходит сквозь промежуточную породу и сколько CO_2 удаляется из нее. Келемен и Маттер консультируют компанию. Если этот эксперимент покажет, что CO_2 быстро переходит в минералы, о чем основатель 44.01 Талал

Хасан (Talal Hasan) должен узнать в течение примерно четырех месяцев, компания планирует начать свою первую коммерческую операцию закачки в 2022 г. Она будет использовать пресную воду или, возможно, очищенные сточные воды для прокачки 10 тыс. т газа в год через одну скважину с надеждой в конечном итоге увеличить объем до 100 тыс. т в год. Компания также планирует провести второе пробное испытание ближе к берегу с использованием морской воды.

Предприниматель Хасан рассматривает 44.01 как компанию по карбонизации минералов, которая будет продавать свои услуги таким фирмам, как швейцарская *Climeworks* или канадской *Carbon Engineering*, которые будут использовать свои установки прямого захвата воздуха в Омане. Углекислый газ, выбрасываемый в воздух в любой точке Земли, разносится по всей планете, поэтому газ можно улавливать и распоряжаться им в любом удобном месте. Оман может стать важным мировым центром хранения.

Хасан считает, что однажды 44.01 сможет ежегодно внедрять на территории Омана в мантийные свиты 1,3 млрд т CO_2 . Это количество внесло бы существенный вклад в те 2–20 млрд т CO_2 , которые людям необходимо удалять из воздуха каждый год, чтобы оставаться в пределах потепления 1,5° C. В настоящее время 44.01 — единственная компания, пытающаяся закачать диоксид углерода в породы мантии, но в отчете Национальной академии наук США за 2019 г. говорится, что аналогичные свиты мантии во всем мире могли бы вмещать до 10 млрд т в год. С использованием базальтов, как, например, в *Carbfix*, можно было бы в дальнейшем увеличить мощность.

Изолирование 1 млрд т CO_2 в год в Омане потребует подключения огромной инфраструктуры. Келемен подсчитал: чтобы концентрация газа в 440 раз превышала естественное содержание в морской воде, что несложно сделать с помощью современных воздухозаборников, потребовалось бы 5 тыс. нагнетательных скважин. Вместе они смогут перекачивать 23 км³ воды в год — около 4% стока реки Миссисипи. Масштаб такой операции может потрясти, но критическая климатическая ситуация требует серьезнейшего вмешательства. И все равно эта операция представляется совсем небольшой по сравнению с инфраструктурой, необходимой для добычи ископаемого топлива. Только в США насчитывается более миллиона нефтяных и газовых скважин. Конечно, от человечества будет зависеть, использует ли оно возможность перехода на возобновляемые источники энергии, а не лицензию на выброс еще большего количества двуокиси углерода.

Затраты будут решать все. *Carbfix* в Исландии производит минералы из CO_2 примерно за \$25 за 1 т (44.01 не публикует никаких официальных оценок затрат). Согласно отчету международной

группы ученых за 2018 г., опубликованному в журнале *Environmental Research Letters*, эти затраты укладываются в ценовые диапазоны таких стратегий, как лесовосстановление и рациональное использование плодородия земель, которые хранят двуокись углерода, но не столь надежно.

Настоящая задача состоит в том, чтобы улавливать и сгущать CO_2 до его закачки. Сотрудница Келемена Дженнифер Уилкоккс (Jennifer Wilcox), первый заместитель помощника секретаря США по энергетике на ископаемом топливе, и ее аспирант Ноа Маккуин (Noah McQueen) из Пенсильванского университета разработали программу оценки совокупных затрат на улавливание и сжатие CO_2 , включая заработную плату рабочих и расходы на монтаж и обслуживание оборудования в течение 20 лет. Полученные цифры приводят к стоимости примерно от \$120 до \$220 за тонну CO_2 , удаленного из атмосферы. Прямой захват воздуха требует большого количества энергии. Уилкоккс поясняет: «Если вы решите использовать ископаемое [топливо], вы должны подумать о стоимости содержания дополнительно производимого углекислого газа». Как говорит Аджай Гамбхир (Ajay Gambhir), экономист-климатолог из Имперского колледжа Лондона, технология еще молода и новые изобретения могут уменьшить ее финансовую емкость. Если техническое оснащение будет следовать по той же траектории, что и ветряные турбины за последнее десятилетие, оно может в ближайшем будущем стоить около четверти сегодняшней цены. «Но мы не узнаем этого наверняка, пока не примемся за дело при высоких вложениях», — отмечает Гамбхир.

Маловероятно, что многие загрязняющие воздух производства будут платить за улавливание парниковых газов из воздуха и карбонизацию минералов, пока правительства не установят плату за выбросы. Грегори Немет (Gregory Nemet), исследователь энергетической политики из Висконсинского университета в Мадисоне, говорит, что, хотя текущие налоги на выбросы углекислого газа, взимаемые промышленно развитыми странами, обычно составляют менее \$50 за тонну CO_2 , стандарт на углеродное топливо в Калифорнии побуждает компании тратить до \$200 за тонну по квотам на выбросы углекислого газа, при этом цены, вероятно, со временем вырастут. Такая цифра открывает перспективу компании, получающей твердые минералы, как 44.01, работающей в партнерстве с компанией прямого воздушного улавливания, начать небольшие совместные мероприятия. По мере того как все больше правительств устанавливают плату за выбросы углекислого газа в атмосферу, спрос на их услуги может возрасти. «К 2025 г. им не придется задействовать гигатонны $[CO_2]$, — говорит Немет. — Что им нужно, так это ряд все более крупных объектов, на которых они учатся и совершенствуются, чтобы со временем снизить стоимость».

Оман — привлекательное место не только благодаря геологическим особенностям; масштабная энергетическая система страны, использующая ископаемое топливо, имеет опыт работы с газами под высоким давлением, а солнечный свет здесь ярок круглый год. Согласно расчетам Маккуина, улавливание 1 млрд т газа в год потребует затрат от 700 млрд до 1,3 трлн кВт·ч электроэнергии. Эта энергия может быть получена от 300–600 км² солнечных батарей, занимающих не более 0,2% территории Омана, что рассчитано по стандартным формулам, исходя из интенсивности солнечной радиации.

Оман также славится своими живописными береговыми линиями, каньонами, средневековыми крепостями и мечетями, которые ежегодно привлекают миллионы туристов. И здесь на своей родной земле совершает сезонные миграции бедуинское население, сохраняя традиции. Это хрупкое наследие необходимо защищать, но в стране, как и на Аравийском полуострове в целом, много пустующих и засушливых земель, на которых могут вырасти промышленные предприятия с неблагоприятными выбросами.

У ученых есть и другие представления о том, как использовать породы мантии. Некоторые предлагают извлечь их, измельчить, чтобы увеличить площадь поверхности, и разбросать на тысячи квадратных километров пустыни, где они естественным образом поглощали бы углекислый газ. Каждый год их можно будет собирать и подвергать термической обработке, чтобы удалить CO₂, а затем снова раскладывать. CO₂ придется утилизировать путем закачки в другие горные породы или использовать в качестве сырья для получения пластмасс и синтетического топлива. Альтернативный вариант: породы можно было бы разбросать на пахотных землях, где они могли бы поглощать CO₂ и в дальнейшем улучшать качество почвы. В любом случае добыча, дробление и транспортировка камня могут навредить ландшафту и потребовать много энергии. По крайней мере в Омане скромное предложение Келемена пробурить 5 тыс. нагнетательных скважин может показаться менее радикальным. Скважины могут быть расположены вдоль части береговой линии, где уже ведутся промышленные работы, нарушая пейзаж не больше, чем прибрежная ветряная электростанция. Солнечные батареи могут быть размещены на тщательно отобранных отдаленных участках внутри суши.

На данный момент Келемен говорит, что он просто радуется первому шагу, видя полевые испытания в Вади-Лауэйни. Его путь был долгим: от отстраненного любопытства в начале 2000-х гг. до откровенного волнения сегодня. Он уже думает о том, как можно уменьшить физическое воздействие карбонизации минералов. Однажды вечером в 2018 г. он повел меня на каньон. В тусклом

свете сумерек он остановился и указал на красноватую острую вершину справа от нас. «В этой горе скрыт миллиард тонн углекислого газа», — заявил он. Карбонатные жилы всего Омана составляют только 1% объема пород, выходящих на поверхность, но, по словам Келемена, в этой маленькой горе каждый отдельно взятый атом магния и каждый атом кальция соединяются с CO₂ с образованием карбоната.

Породы Омана образовались из тех же минералов мантии, которые встречаются повсюду. Но они вступили в реакцию с диоксидом углерода и водой гораздо раньше, когда еще находились на глубине и поэтому были очень горячи. (Вода и CO₂ поступали из близлежащей глубинной зоны субдукции, где океанические осадки подвергались тепловому воздействию при погружении в мантию.) На основе геохимических анализов, опубликованных в 2020 г., Келемен считает, что породы были разогреты до 250° C, когда шло образование минералов с участием CO₂, то есть было достаточно горячо, чтобы довести растрескивание под действием реакции до завершения, когда каждый кусочек породы мог бы прореагировать. Многие мантийные породы Омана сегодня вполне нагреты, но они находятся на глубине 5–6 км под земной поверхностью. Как поясняет Хасан, потребуется более сложное бурение, чтобы с ними взаимодействовать, и экспериментальные исследования могут доказать его экономический смысл.

В конце концов, отрасль с отрицательными вредными выбросами все еще находится на стадии становления, на которой находилось бурение нефтяных скважин в середине 1800-х гг., когда его еще сдерживало мощное производство китового жира. Первые нефтяные скважины имели глубину всего несколько метров. Компании постепенно углублялись в поисках более крупной добычи. Продвижению способствовали улучшенные технологии бурения, бурное развитие глобальной инфраструктуры горной добычи, транспортировки и продажи ценного продукта, а также растущее отчаянное желание большего. Эти же силы могут однажды заставить людей углубиться дальше в поисках другого ресурса: горячих пород, превращающих CO₂ в твердую субстанцию. А Оман, страна, заработавшая миллиарды долларов, продавая добытое из-под земли углеводородное сырье всему миру, мог бы сделать гениальный ход: заработать еще миллиарды долларов на закапывании двуокси углерода обратно в землю. ■

Перевод: В.И. Сидорова

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Лакнер К. Удаляя углекислый газ из воздуха // ВМН, № 7, 2010.



УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

КОВЕР

АЛЬТЕРНАТИВ

Для гармоничного сосуществования с биосферой
потребуется построить взаимоотношения,
сконцентрированные на поддержании жизни —
как людей, так и других биологических видов

Ашиш Котхари

Семена местных растений, питаемые дождевой водой и органическими удобрениями, помогают Надимидодди Винодамме (Nadimidoddi Vinodamma) из Общества развития Декана (DDS), кооператива фермеров на юге Индии, выращивать достаточно продовольствия для своей семьи и продажи на местных рынках

ОБ АВТОРЕ

Ашиш Котхари (Ashish Kothari) — учредитель индийской некоммерческой экологической организации *Kalpavriksh*, помогает координировать проект *Global Tapestry of Alternatives*, редактор и соавтор нескольких книг, в том числе «Встряска Земли» (*Churning the Earth*, 2012) и «Множественная Вселенная» (*Pluriverse*, 2019).



В марте этого года во время нашего разговора Молигери Чандрамма (Moligeri Chandramma) заверила меня, что ни один житель ее деревни не испытывал нехватки продуктов во время локдаунов и ни один не пострадал от COVID-19. Чандрамма, фермер из засушливого района на юге Индии, выращивает на площади чуть больше 1 га более 40 видов и сортов сельскохозяйственных культур — преимущественно местные виды проса, риса, чечевицы и специй. Она член Общества развития Декана (*Deccan Development Society, DDS*), кооператива, объединяющего почти 5 тыс. женщин, принадлежащих к далитам (низшей касте) и адиваси (коренным народам).

В 2019 г. общество получило престижную премию в рамках Экваториальной инициативы ООН за удивительное объединение занятий сельским хозяйством (в качестве источника средств существования) с поддержанием биоразнообразия. Общество развития Декана создавалось в 1980-х гг. в условиях критической нехватки продовольствия и социальной и гендерной дискриминации, но теперь фермеры довольны продовольственной независимостью и экономической безопасностью.

Они не просто успешно переживают связанный с пандемией кризис: в 2020 г. каждая семья — участник *DDS* пожертвовала около 10 кг зерна в качестве гуманитарной помощи тем, у кого нет собственной земли и источника средств существования. На другом краю земли шесть общин кечуа, коренного народа Перуанских Анд, управляют картофельным парком Парк-де-ла-Папа в Писаке, департамент Куско. Эта горная местность — одно из мест происхождения картофеля, его родина. Кечуа защищают регион как территорию «культурного и природного наследия», сокровищницу природных и культурных богатств, унаследованных от предков, и сохраняют более 1,3 тыс. сортов картофеля. Когда мне вместе с другими исследователями и активистами довелось побывать в этом парке, я был просто ошеломлен таким разнообразием.

«Это результат 20 лет непрерывной работы по релокализации нашей продовольственной системы, которая началась, когда удовлетворение наших базовых потребностей стало слишком зависеть



от сторонних организаций, — рассказал в августе 2020 г. фермер Мариано Сутта Апокуси (Magiano Sutta Apocusi) представителям организации *Local Futures*, занимающейся поддержкой местных общин по всему миру. — Сосредоточившись на местном производстве, мы смогли повысить доступность разнообразных продуктов, в особенности местного картофеля, киноа, кивичи, других характерных для Анд клубневых растений и кукурузы, которые мы выращиваем с использованием традиционных агроэкологических методов». С началом пандемии общины ввели строгие меры по защите здоровья и обеспечению безопасности, даже когда они собрали небывалый урожай и отправили более



Молигери Чандрamma управляет банком семян DDS (1), включающим семена более 70 видов и сортов сельскохозяйственных культур. Люди собрались в 2005 г. (2), чтобы отметить 20-летие незатухающих протестов против строительства плотины на реке Нармаде.

тонны картофеля мигрантам, старикам и расположенному в Куско приюту для подвергшихся насилию юных матерей.

В Европе, когда в результате локдаунов из-за COVID-19 огромное число людей остались без работы и оказались в отчаянном положении, за дело взялись многие организации, продвигающие инициативы в области экономики солидарности, справедливого распределения и участия. В Лиссабоне социальные центры *Disgraça* и *RDA69*, стремящиеся восстановить жизнь общества, которое в иных условиях в городе крайне разобщено, предлагали бесплатную или дешевую еду всем, кто в этом нуждался. Центры не только раздавали продукты, но и, создавая сеть социальной безопасности, предоставляли помещения, где беженцы, бездомные, безработные и другие люди, которые в противном случае, возможно, сломались бы и опустили, могли общаться и развивать отношения с обеспеченными семьями. Людям с достатком организаторы дали возможность делать пожертвования в виде продуктов или денег для реализации этого проекта, способствуя возникновению общности у жителей окружающих районов.

Пандемия обнажила хрупкость глобализированной экономики, которую рекламируют как выгодную для всех, но на самом деле она создает неравенство и порождает чувство неуверенности. Только в одной Индии в 2020 г. 75 млн человек проживали за чертой бедности; по всему миру сотням миллионов людей, чье выживание и достаток зависят от международной торговли и обмена товарами и услугами, был нанесен тяжелый удар. Подобные, хотя и менее экстремальные, недостатки выявились во время финансового кризиса 2008 г., когда спекуляции товарами вместе с переводом продовольственного зерна на производство биотоплива спровоцировали резкий рост мировых цен на зерно, что, в свою очередь, привело к голоду и продовольственным бунтам во многих странах, зависящих от импорта продовольствия. Угроза для жизни возникает и в том случае, когда движение товаров останавливается из-за войны или других беспорядков. Во время подобных кризисов меньше проблем с продовольствием испытывают сообщества, имеющие локальные рынки товаров и услуг и способные не только обеспечить продуктами, энергией и водой самих себя, но и позаботиться о тех, кому повезло меньше.

Однако ценность таких альтернативных способов существования заключается не только в том, что они обеспечивают гибкость во время относительно кратковременных периодов потрясений,

подобных пандемии. Я, как исследователь и активист-эколог из так называемой развивающейся страны, давно выступаю за то, чтобы мировоззрение людей, живущих близко к природе, учитывалось в рамках глобальных стратегических инициатив по охране дикой природы, таких как Конвенция ООН о биологическом разнообразии и Международный Союз охраны природы (*International Union for Conservation of Nature, IUCN*). В последние десятилетия я пришел к выводу, что критики глобализации, например социолог и эколог Вольфганг Сакс (Wolfgang Sachs), правы

в том, что предотвращение потрясений, подобных резкому сокращению биоразнообразия, потребует не только адаптации к окружающей среде, но и радикальных изменений парадигм, господствующих в экономике, социальной сфере и даже в политике.

В 2014 г. я и еще несколько человек из Индии инициировали процесс изучения способов построения такого мира, в котором люди живут в согласии друг с другом и с природой. Пять лет спустя (и по случайному совпадению — как раз перед началом пандемии) это начинание превратилось в международную онлайн-сеть, названную «Глобальный свод альтернатив» (*Global Tapestry of Alternatives*). Беседы, подобные упомянутой выше, и другие исследования показывают, что успешные варианты, неважно в каком уголке мира они реализуются, обычно основаны на самообеспечении и солидарности.

Подобные ценности препятствуют глобализации, которая обеспечивает жителей «глобального Севера» (то есть богатых, независимо от места проживания) многими вещами, которые мы стали считать необходимыми. Обещание постоянно растущего богатства поддерживает нашу цивилизацию, но люди, живущие на ее задворках, обладают разнообразными представлениями о том, что значит «жить хорошо», зависящими от специфики их экосистем и культур. Я уверен: для того чтобы вернуться с края обрыва, ведущего к необратимой дестабилизации биосферы, мы должны дать возможность развиваться альтернативным подходам, подобным тем, что используют фермеры-далиты, кечуа и волонтеры в Лиссабоне, и, объединяя их, соткать «ковер альтернатив», который в конце концов укроет весь мир.



Поездка-открытие

Тот факт, что я вырос в Индии, где в крупных районах сохраняется стиль жизни, неразрывно связанный с окружающей средой, безусловно, повлиял на мои представления о том, из чего складывается настоящее устойчивое развитие. В 1970-х гг., будучи старшеклассником, любившим наблюдать за птицами в лесах вокруг Дели, я присоединился к своим одноклассникам во время демонстрации перед посольством Саудовской Аравии, когда несколько принцев прибыли в нашу страну, чтобы поохотиться на индийскую большую дрофу (*Ardeotis nigriceps*) — вид птиц, находящийся на грани полного исчезновения. Наш протест, наряду с протестами общины вишнуитов в Раджастанхана, традиционно занимающейся охраной этих птиц и других видов диких животных, поставил индийское правительство в неловкое положение, вынудив его попросить охотников уехать домой. Многие из нас также приняли участие в кампании по защите леса Дели-Ридж — одного из крупнейших тропических лесов в черте города. В 1979 г. мы сформировали группу защитников окружающей среды для систематизации наших усилий. Группу назвали «Кальпаврикша» (*Kalpavriksh*) в честь мифологического дерева, исполняющего желания; название символизировало наше растущее осознание того, что природа дает нам все.

Во время нашей работы мы узнали не меньше, чем в школе и колледже. Например, изучая источники загрязнения воздуха в Дели, мы беседовали с жителями деревень, расположенных вокруг угольной электростанции, находящейся за чертой города. Оказалось, что они гораздо больше страдают от пыли и загрязнения, чем городские жители,



Парк-де-ла-Пана (1) в Перу — одно из мест происхождения картофеля. Коренной народ кечуа (2) управляет регионом как объектом культурного и природного наследия, сохраняя выдающееся разнообразие сортов картофеля (3).

хотя электростанция не снабжала их энергией. Выгоду от проекта получали в основном и так уже довольно состоятельные жители, а максимальный вред был причинен людям, лишенным электричества.

В конце 1980 г. мы отправились на запад Гималаев, чтобы встретиться со сторонниками ставшего иконой движения Чипко. С 1973 г. деревенские женщины заслоняли своими телами деревья, предназначенные для вырубki. Они рассказали нам, что вырубались гималайский кедр, дубы, рододендроны и другие виды, которые не только священны для жителей деревни, но и необходимы для их выживания. Эти виды обеспечивают корм для домашнего скота, удобрения, продукты питания и поддерживают водные ресурсы. Даже я, студент-горожанин, оценил важность той роли, которую сельские женщины играли в защите окружающей среды, и осознал, насколько несправедливо то, что где-то бюрократы принимают решения, не задумываясь, как они повлияют на людей на местах.

Вскоре мы узнали, что в бассейне реки Нармады в Центральной Индии собираются построить 30 крупных плотин. Миллионы людей поклоняются Нармаде как обладающей буйным нравом, но щедрой богине, настолько чистой, что считается, будто Ганг каждый год посещает ее, чтобы смыть свои грехи. Совершая пешие переходы, передвигаясь на лодках и на автобусах вдоль этой реки протяженностью 1,3 тыс. км, мы восхищались водопадами, низвергающимися в изумительные ущелья, склонами, покрытыми густыми лесами, кишачими дикими животными, полями с различными сельскохозяйственными культурами, цветущими деревнями и древними храмами. И все

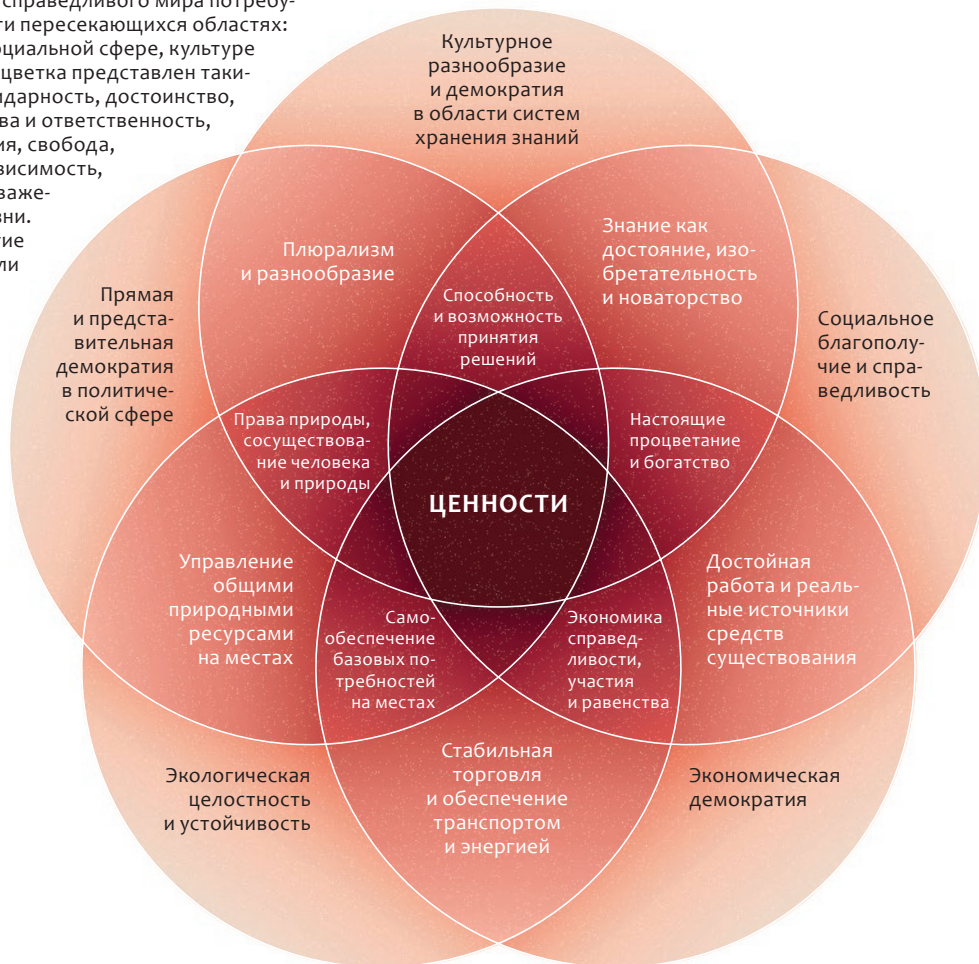


это должны были затопить. Мы стали ставить под сомнение саму концепцию развития: не окажутся ли последствия разрушения значительно весомее, чем любые возможные выгоды? Почти четыре десятилетия спустя наши опасения оправдались. Сотни тысяч переселенных людей все еще ожидают реабилитации, а поток реки, перегороженной плотинами, внизу по течению превратился в тоненькую струйку, дав возможность водам моря проникать на глубину 100 км.

С годами я стал понимать, насколько велика власть экономических сил по всей планете, чтобы тесно связать социальную несправедливость с разрушением окружающей среды. Эпоха колонизации и рабства значительно расширила экономическое и военное влияние некоторых государств и связанных с ними корпораций, дав возможность извлекать природные ресурсы по всему миру, чтобы обеспечить ресурсы начавшуюся в Европе и Северной Америке промышленную революцию. Специалисты по истории экономики, антропологи и другие ученые продемонстрировали, что в этот болезненный период истории были заложены основы современной мировой экономики. Помимо стимулирования необратимого разрушения окружающей среды, экономическая система лишает многие сообщества доступа к общим природным богатствам — рекам, лугам и лесам, необходимым

Сфера преобразований

Создание устойчивого и справедливого мира потребует преобразований в пяти пересекающихся областях: экономике, политике, социальной сфере, культуре и экологии. Центр этого цветка представлен такими ценностями, как солидарность, достоинство, взаимосвязанность, права и ответственность, разнообразие, автономия, свобода, самоопределение, независимость, простота, ненасилие и уважение ко всем формам жизни. Коренные жители и другие народы веками разделяли сходные ценности, ими же руководствуются люди в индустриальных обществах и отстаивают их для преодоления глобальных экологических и социальных кризисов.



для их выживания, — создавая зависимость от внешних рынков. Тот факт, что огромное количество людей пострадало во время пандемии, просто обнажил эти проблемы.

Во время своих путешествий и в ходе работы над книгой вместе с экономистом Асимом Шриваставой (Aseem Shrivastava) я обнаружил, что существует и более обнадеживающая тенденция. В Индии и по всему миру сотни социальных движений поддерживают маргинализированные сообщества в их борьбе за возвращение контроля над своей жизнью и источниками средств существования. В 2014 г. «Кальпаврикша» организовала серию встреч под названием «Собрание альтернатив» (Vikalp Sangam), где люди, возглавляющие такие вдохновенные усилия, могли собраться, поделиться идеями и опытом и поработать совместно, помогая создавать критическую массу для изменений.

Подобные взаимодействия и различная литература дали мне ответ на жизненно важный вопрос,

изучением которого я занимался: каковы необходимые характеристики эффективных альтернатив? К счастью, в своем поиске я был не одинок. В 2014 г. на конференции сторонников концепции антироста в Лейпциге меня взволновало выступление Альберто Акости (Alberto Acosta), экономиста и бывшего политика из Эквадора, говорившего о *buena vida* (исп. «жить хорошо»), мировоззрении коренного народа, основанном на существовании в согласии друг с другом и природой. И хотя Акости не говорил по-английски, а я не говорю по-испански, мы активно пытались пообщаться, впоследствии к нам присоединился специалист по концепции антироста Федерико Демарио (Federico Demario) и помог с переводом. Мы решили продолжить работу над сбором данных об эффективных альтернативах, используемых во всем мире, набросав 20 возможных идей на обратной стороне бумажного конверта. Позже мы связались с критиком развития Артуро Эскобаром (Arturo

Escobar) и экологом-феминисткой Ариэль Саллех (Ariel Salleh), которые вместе с нами стали редакторами книги под названием «Множественная Вселенная» (*Pluriverse*), в которой насчитывается больше 100 статей.

Общие черты

Несмотря на поразительное несходство, для появляющихся по всей планете альтернатив характерны общие базовые принципы. Наиболее важный — поддержание или возрождение власти сообществ над такими общими ресурсами, как земля, экосистемы, зерно, вода и знания. В Англии власть имущие в XII в. начали обносить изгородями поля, луга, леса и ручьи, которые прежде использовались всеми. Огораживание, проводимое лендлордами и промышленниками, распространилось по Европе и ускорило с началом промышленной революции. Этот процесс заставлял десятки миллионов людей, согнанных с земли, становиться рабочими на заводах или эмигрировать в Новый Свет, что приводило к снижению численности коренных жителей. Государства-империи захватили большую часть континентов и перестроили экономику колоний, добывая сырье для заводов, захватывая рынки для экспорта произведенных товаров и получения таких продуктов, как пшеница, сахар и чай, для вновь созданного рабочего класса. Так колонизаторы и их союзники установили систему постоянного экономического доминирования, которая породила «глобальный Север» и «глобальный Юг» (мир оказавшихся на окраине независимо от места их проживания).

Поднявшаяся в первые несколько десятилетий XX в. волна антиколониальных движений (многие из них добились успеха) породила страх, что поток сырья для промышленности иссякнет и исчезнут рынки для готовых изделий более высокого качества. Президент Гарри Трумэн отреагировал на эти процессы, начав реализацию программы по снижению уровня бедности в регионах, которые он охарактеризовал, как «недоразвитые», с «примитивной и застойной» экономикой. Как уточнил эколог Дебал Деб

(Debal Deb), вновь сформированные финансовые институты, контролировавшиеся богатыми странами, помогали бывшим колониям «развиваться» по пути, определенному Западом, обеспечивая материальными и энергетическими ресурсами и создавая рынки для автомобилей, холодильников и других потребительских товаров. Неотъемлемым аспектом развития (поскольку так было задумано и обычно навязывалось строгими условиями предоставления кредитов Всемирного банка и Международного валютного фонда) была приватизация или конфискация государством общих ресурсов для добычи металлов, нефти или воды.

Однако, как продемонстрировала лауреат Нобелевской премии по экономике 2009 г. Элинор Остром (Elinor Ostrom), общими природными



В Фессалониках рабочие, такие как Димитрис Кумацуиулис (Dimitris Koumatsioulis) (1), вместе управляют Vio.Me, заводом по производству экологически безвредных детергентов. В Праге люди покупают и продают товары на местном рынке фермеров и поставщиков (2).

богатствами рационально управляют те сообщества, у которых эти богатства отняли, по сравнению с правительствами или корпорациями с их притязаниями. Это знание привело к появлению на местах бесчисленных инициатив по защите ресурсов и восстановлению контроля над другими. Понятие «общие ресурсы» тоже расширилось и стало включать «материальные ресурсы и знания, которые мы все разделяем ради общего блага», как объясняет социолог Ана Маргарита Эстевес (Ana Margarida Esteves), помогающая Европейской ассамблее общин, головной организации, объединяющей сотни подобных проектов.

Многие из них напоминают Общество развития Декана и Парк-де-ла-Папа: общины управляют находящимися в общем владении ресурсами для того, чтобы совершенствовать применение агроэкологических методов (мелкое фермерство с рациональным использованием почвы, воды и поддержанием биоразнообразия), а также повысить продовольственную независимость (контроль над всеми средствами производства продуктов, в том числе земель, семенами и знаниями о том, как их использовать). Движение за продовольственную независимость *La Via Campesina*, появившееся в Бразилии в 1993 г., теперь объединяет около 200 млн фермеров из 81 страны. Подобные усилия по переходу на самообеспечение и общинное управление затрагивают и другие базовые потребности, такие как снабжение энергией и водой. В Коста-Рике, Испании и Италии сельские кооперативы с 1990-х гг. на местах занимаются производством электричества и контролируют его распределение. А сотни деревень на западе Индии перешли к «водной демократии», основанной на децентрализованном водоснабжении и общинном управлении водно-болотными угодьями и подземными водами. Для подобных предприятий необходима мобилизация людей для поддержания, построения или воссоздания местных систем знаний.

Кроме того, важны гарантированные права на управление общими ресурсами. В бассейне реки Амазонка на территории Эквадора индейцы сапара боролись, чтобы получить общие права на влажный экваториальный лес, служащий им домом.



В саду Kuzguncuk Bostani («Бахчи Кузгунджука», Стамбул) на земле общего пользования городские жители могут совместно выращивать фрукты, овощи и другую сельскохозяйственную продукцию

Теперь они защищают лес от добычи полезных ископаемых и одновременно разрабатывают модель экономического процветания, в которой сочетаются их традиционные космополитические представления (о том, что способы получения знаний, образ жизни и действий физически и духовно неразрывно связаны с окружающей средой) и новые виды деятельности, такие как возглавляемый общиной экотуризм. Во время пандемии доходы от экотуризма упали, но лес дает людям почти все, что им нужно: пищу, воду, энергию, жилище. Сейчас сапара предлагают онлайн-сессии, посвященные их представлениям о мире и целостности. Я лично принял участие в таких собраниях в 2019 г. в экологическом лагере сапара в Наку. Виртуальная версия не дает подобного эффекта погружения, но тем не менее представляет собой изобретательную адаптацию к сложившимся обстоятельствам.

Для озеленения городов или создания в них более доброжелательной среды, подобно тому, что делают социальные центры в Лиссабоне, тоже необходимы управление на местах и экономика солидарности и справедливости. На «глобальном Юге» проекты развития вынудили сотни миллионов людей отправиться в города, где они живут в трущобах и работают во вредных условиях. Богатые горожане могли бы внести свой вклад, сократив потребление, что привело бы к снижению добычи сырья и количества отходов (именно эти причины вынуждают людей переселяться). Появился целый ряд движений, выступающих за города с большим равноправием и лучшей экологией.

В их числе, например, движение «За преобразование» (*Transition Movement*), борющееся за повторное использование ресурсов и прекращение выбросов парниковых газов в европейских городах, и движение муниципализма, которое создало сеть «Города без страха» (*Fearless Cities*) (в их числе Барселона, Вальпараисо, Мадрид и Афины), чтобы обеспечить безопасную среду для беженцев и мигрантов. Городское сельское хозяйство в Гаване обеспечивает больше половины потребности города в свежих продуктах и вдохновило многие проекты городского фермерства по всему миру.

Пять лепестков

Подобные инициативы указывают на необходимость фундаментальных изменений в пяти взаимосвязанных областях.

В сфере **экономики** необходимо отказаться от парадигмы развития, включая представление о том, что экономический рост, оцениваемый с помощью такого показателя, как валовой внутренний продукт, — лучший способ достижения целей человечества. Вместо этого нам нужны системы для сбережения ограниченных ресурсов окружающей среды, придания особого значения процветанию во всех сферах и локализации обмена, предоставляющие возможность для самообеспечения. Нужны и надежные показатели для оценки. Бутан давно проводит эксперимент с использованием такого индекса, как валовое национальное счастье. Идея породила различные варианты: например, недавно в Новой Зеландии в качестве оценки прогресса стали использовать уровень психического здоровья и другие подобные показатели.

Необходима также свобода от централизованного монетарного и финансового контроля. Сейчас проводится множество экспериментов с переходом на альтернативные валюты и экономику, основанную на доверии и местном обмене. Вероятно, наиболее изобретательный вариант — «тайм-банкинг». Это система для обмена услугами, основу которой составляет следующий принцип: все навыки или деятельность заслуживают одинакового уважения. Например, один человек может провести час занятий йогой в кредит, который можно выплатить в виде ремонта велосипеда в течение часа.

Во многих частях света рабочие стремятся контролировать средства производства: землю, природу, знания и оборудование. Несколько лет назад я посетил компанию *Vio.Me*, завод по производству детергентов в Салониках. Рабочие вступили во владение заводом и перевели производство химикатов на выработку экологически безвредной продукции на основе оливкового масла. Кроме того, рабочие установили абсолютное равенство в зарплатах независимо от вида выполняемой работы. Лозунг на стене гласит: «У нас нет босса!»

Фактически переосмысливается само определение труда. Современная эпоха глобализации создала пропасть между трудом и отдыхом, вот почему мы с таким нетерпением ждем выходных в конце недели! Многие движения стремятся устранить этот разрыв, предоставив возможность для творчества и получения большего удовлетворения от труда. В промышленно развитых странах люди возвращаются к ручному пошиву одежды, изготовлению обуви и бакалейных товаров под лозунгом «Будущее сделано вручную!» На западе Индии многие молодые люди оставляют убивающую душу рутинную работу на фабриках и возвращаются к ручному ткачеству, которое дает им возможность управлять своим графиком и при этом получать творческий результат.

В **политической сфере** централизация, присущая любому государству, как демократическому, так и авторитарному, лишает власти многих людей. Индейцы сапара в Эквадоре и адиваси в Центральной Индии выступают за прямую демократию, когда власть в основном принадлежит обществу. В этом случае государство, поскольку оно продолжит существовать, могло бы в основном помогать с координацией в более крупных масштабах, но при этом было бы строго подотчетно центрам принятия решения на местах. Здесь особенно подходит древнеиндийское понятие *swaraj*, буквально означающее «самоуправление». Оно подчеркивает индивидуальную и коллективную автономию и свободу, связанные с ответственностью за автономию и свободу других. Например, общество, в котором практикуется *swaraj*, не вправе перегородить плотиной реку, если это угрожает водоснабжению деревень вниз по течению; такое общество не может процветать, поставив под угрозу благополучие других.

Подобное понимание демократии ставит под сомнение существующие государственные границы, многие из которых представляют собой историческое наследие колониализма и разрывают экологически и культурно близкие области. Например, курды населяют территорию, разделенную между Турцией, Ираном, Ираком и Сирией. Этот народ в течение 30 лет борется за автономию без разъединяющих их границ и прямую демократию, основанную на принципах экологической устойчивости и равноправия женщин. А в Мексике группы коренных народов, примкнувшие к движению сапатистов, больше трех десятилетий отстаивают свои права на землю и поддерживают автономный регион, основанный на таких же принципах.

Переход к подобной радикальной демократии означал бы переход к миру с гораздо меньшим числом границ, в котором десятки тысяч относительно автономных и самостоятельных сообществ сплетены в единый ковер альтернатив. Эти сообщества были бы связаны друг с другом через

горизонтальные сети равноправного и вежливого обмена, а также через вертикальные, но подотчетные низам институты, управляющие процессами и деятельностью на всей территории.

В настоящее время проводится несколько био-региональных экспериментов на больших территориях, хотя большинством этих проектов по-прежнему управляют по принципу «сверху вниз». В Австралии в рамках инициативы «Великие восточные зоны» (*Great Eastern Ranges Initiative*) стремятся координировать охрану экосистем на протяжении 3,6 тыс. км с одновременным обеспечением независимых источников средств для существования и здоровья общества. А цель проекта, охватывающего шесть стран, — сохранение объекта Всемирного наследия Капак-Ньян, построенной инками сети дорог в Андах протяженностью 30 тыс. км и связанных с ней объектов культурного, исторического и природного наследия.

Конечно, самоуправление на местах может приводить и к угнетению, и к исключению определенных групп. Ярким примером служат в высшей степени патриархальные, традиционно опирающиеся на кастовую систему советы в деревнях во многих частях Индии и ксенофобский подход правых политиков в Европе, направленный против мигрантов. Поэтому третья важная область преобразований — **социальная справедливость**, включая борьбу с расизмом, кастовой системой, патриархальными взглядами и другими традиционными или современными формами дискриминации и эксплуатации. К счастью, успех в противостоянии с господствующей экономической системой часто идет рука об руку с победой над дискриминацией. Так, например, занимающиеся фермерством женщины-далиты избавляются от векового гнета кастовой и патриархальной систем, чтобы добиться продовольственной независимости.

Политическая автономия и экономическое самообеспечение не обязательно означают изоляционизм и ксенофобию. Скорее, на смену глобализации, которая вроде бы предоставляет возможности для свободного циркулирования товаров и финансов, но при этом преграждает путь доведенным до отчаяния людям с окраин, придет культурный и материальный обмен, поддерживающий самообеспечение на местах с учетом экологической устойчивости. Такого рода локализация открыла бы доступ к благам нуждающимся; к людям, ставшим беженцами из-за изменений климата или войны, относились бы доброжелательно, как в сети безопасных городов в Европе. И деятельность на местах, и сдвиги в политике могли бы помочь переходу к такой системе. Несомненно, необходимы также усилия по восстановлению общества в регионах, раздираемых конфликтами, чтобы людям не приходилось оттуда бежать.

Радикальные изменения неизбежно ведут к преобразованиям в четвертой сфере — **сфере культуры и знаний**. Глобализация обесценивает языки, культуры и системы знаний, не адаптирующиеся к процессу развития. Несколько движений противостоят такой тенденции к исчезновению различий между культурами. Например, народ сапара пытается воскресить свой почти исчезнувший язык и сохранить знания о лесе, включив изучение этих предметов в учебную программу местной школы. Многие общины проводят «деколониализацию» карт, возвращая собственные названия мест и разрушая политические границы. Даже проекцию Меркатора, появившуюся в колониальную эпоху и использовавшуюся для создания знаковой карты мира, переворачивают с ног на голову. (Только недавно я узнал, что площадь Африки почти равна совокупной площади Европы, Индии, Китая и США.) Для поиска решений наиболее серьезных проблем человечества все чаще используется сочетание традиционных и современных знаний. Например, в рамках исследования «Оценка биоразнообразия Арктики» (*Arctic Biodiversity Assessment*) ученые и коренные народы работают вместе над решением проблемы изменения климата.

Проблема в том, что современные образовательные учреждения готовят студентов, давая им знания, необходимые для обслуживания и поддержания господствующей экономической системы. Тем не менее благодаря усилиям людей процесс обучения вновь связан с общинами и природой. К подобным проектам относятся «лесные школы» во многих странах Европы, проводящие практические занятия для детей на природе, автономные школы сапатистов, в которых дают знания о разных культурах и борьбе, и центры высшего образования *Ecoversities Alliance* по всему миру, дающие студентам возможность получать междисциплинарные знания, вне границ, обычно разделяющих академические дисциплины.

Однако наиболее важная сфера, требующая преобразований, — **экология**. Необходимо осознать, что мы часть природы и что другие биологические виды сами по себе заслуживают бережного отношения. Общины «глобального Юга» возглавляют усилия по восстановлению разрушенных экосистем и популяций диких животных и растений и сохранению биоразнообразия. Например, коренные народы и другие местные общины управляют десятками тысяч «территорий жизни». В их число входят управляемые на местном уровне морские районы Тихого океана в Южном полушарии, территории коренных народов в Латинской Америке и Австралии, общинные леса в Южной Азии и исконные территории на Филиппинах. Примечательны также недавно закрепленные в законодательстве и судебных решениях нескольких

стран положения о том, что, например, реки имеют такое же право на защиту, как и люди. Принятие в 2009 г. первой резолюции ООН, озаглавленной «В гармонии с природой», — важнейшая веха на пути к достижению этой цели.

Ценности

Меня часто спрашивают, как можно применить успешные альтернативные методы в более крупных масштабах. Попытка увеличить масштабы или скопировать *DDS* или Парк-де-ла-Папа обречена на провал. Суть такого подхода заключается в разнообразии: признании того, что каждая ситуация уникальна. Что люди действительно способны сделать (и именно таким образом происходит распространение успешных альтернатив) — так это понять лежащие в основе ценности и применять их в своих сообществах, одновременно налаживая контакты с подобными предприятиями для распространения эффекта.

В ходе встреч *Vicalp Sangam* определились следующие важнейшие ценности: солидарность, достоинство, взаимосвязанность, права и ответственность, разнообразие, автономия и свобода, независимость и самоопределение, простота, ненасилие и уважение ко всем формам жизни. И в древних, и в современных представлениях о мире, сконцентрированных на жизни, сформулированы одни и те же принципы. Коренные народы и другие местные общины веками жили в соответствии с таким мировоззрением, как *buen vivir*, *swaraj*, *ubuntu* (мировоззрение африканских народов, согласно которому благополучие всех живых существ взаимосвязано) и другими подобными этическими системами, и заявляют о них снова. Одновременно в рамках индустриальных обществ появились концепции антироста и экофеминизма, посеявшие семена могущественной контркультуры.

В основе подобных мировоззрений находится простая идея о том, что мы все обладаем властью и, используя ее, не только заявляем о своей автономии и свободе, но и отвечаем за обеспечение автономии других. Такое представление о *swaraj* в сочетании с экологической устойчивостью превращается в *эко-swaraj*, включающее уважение ко всем формам жизни.

Несомненно, подобные фундаментальные преобразования идут вразрез с глубоко укоренившимся положением вещей и встречают ожесточенное сопротивление, если их воспринимают как угрозу. Каждый год убивают сотни защитников окружающей среды. Другая серьезная проблема заключается в том, что большинству представителей «глобального Севера» незнакомы иные идеалы хорошей жизни, кроме «американской мечты». Несмотря на это, успешная реализация многих прогрессивных инициатив и появление новых

указывают на то, что сочетание конструктивных альтернативных вариантов и сопротивления имеет неплохой шанс.

Пандемия *COVID-19* — это катастрофа, подарившая человечеству выбор. Вернемся ли мы к некоему подобию прежней нормальной жизни или выберем новые пути выхода из глобального экологического и социального кризиса? Для того чтобы последнее стало наиболее вероятным, необходимо пойти гораздо дальше, чем реализация политики «Зеленого нового курса» в США, Европе и во всем мире. Особое внимание к проблемам изменения климата и правам трудящихся очень важно, но необходимо также выступать против моделей нерационального потребления, вопиющего неравенства и потребности в национальных государствах.

Настоящее восстановление, направленное на поддержание жизни, должно быть сконцентрировано на всех сферах *эко-swaraj*, и добиться этого можно, реализуя следующий комплекс мер. Во-первых, создание (или восстановление уничтоженных) надежных независимых источников средств существования для 2 млрд людей на основе коллективного управления природными ресурсами и мелкомасштабных производственных процессов, таких как фермерство, рыболовство, ремесла, обработка материалов и предоставление услуг. Во-вторых, программа по восстановлению и сохранению экосистем, возглавляемая коренными народами и местными общинами. В-третьих, прямые инвестиции в здравоохранение, образование, транспорт, строительство жилищ, энергетику и другие сферы, связанные с обеспечением базовых потребностей, запланированным и осуществляемым местной демократической властью. Наконец, ключевую роль в переходе к моделям рационального производства и потребления играют стимулы и препятствия. Здесь должны сочетаться рациональное природопользование, равенство и разнообразие; каждый, особенно отверженные, должен иметь право голоса. К такого рода проектам относятся предложение миллионов вакансий в рамках исследований изменения климата в Южной Африке, а также феминистский план восстановления экономики на Гавайских островах и несколько инициатив по достижению социальной справедливости в других странах.

Выполнить все перечисленное будет непросто, но я уверен, что это необходимо, если мы хотим заключить мир с нашей планетой и друг с другом. ■

Перевод: С.М. Левензон

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Стиглиц Д. Измерить то, что важно // ВМН, № 10, 2020.

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

Как земля МОЖЕТ ПОМОЧЬ спасти Землю

Методы ведения сельского хозяйства,
способствующие сохранению углерода в почве,
способны ограничить интенсивность эрозии
и изменение климата

Джо Хандельсман



ОБ АВТОРЕ

Джо Хандельсман (Jo Handelsman) — директор Висконсинского института открытий при Висконсинском университете в Мадисоне и бывший советник по науке президента Барака Обамы; автор готовящейся к выходу книги «Мир без почвы» (*A World Without Soil*).



Район пыльных бурь в Америке 1930-х гг. продемонстрировал разрушительные последствия деградации почв. Методы земледелия, использовавшиеся на протяжении десятков лет, лишили Великие равнины их плодородного наследия и сделали уязвимыми к серьезным засухам. Опустошительные ветры поднимали в воздух столбы грунта, оставляя после себя насыщенный пылью воздух и бесплодный ландшафт. Тысячи людей умерли от голода и легочных заболеваний; другие переселились на Запад в поисках продовольствия, работы и чистого воздуха.

Сегодня мы опять сталкиваемся с потенциальной угрозой интенсивной эрозии почв, но на этот раз опасность обостряется из-за изменений климата. Эти факторы вместе представляют беспрецедентную двойную угрозу как для снабжения продовольствием, так и для здоровья планеты. Однако фермеры могут стать ключевыми партнерами в процессе предотвращения катастрофических последствий. С помощью доступных методов можно сдерживать эрозию и, соответственно, изменение климата за счет внедрения большего количества углерода в почву.

В ходе фотосинтетической фиксации углерода CO_2 удаляется из воздуха и превращается в растительный материал, который затем может депонироваться в почве. Этот процесс (называемый секвестрацией углерода) ведет к снижению концентрации парниковых газов в атмосфере и уменьшению интенсивности эрозии за счет обогащения почвы углеродом, поскольку бактерии, использующие углерод в качестве пищи, вырабатывают клейкие вещества, которые, в свою очередь, связывают частицы почвы в комки, менее уязвимые к перемещению под воздействием ветра и воды. У администрации Джо Байдена есть возможность предотвратить оба кризиса путем проведения внутренней политики, направленной на поддержание сельского хозяйства, и внешней политики, которая могла бы восстановить лидерство США в борьбе против изменения климата. В большинстве планов, направленных на реализацию срочных мер в чрезвычайной ситуации с климатом,

ключевой элемент — снижение выбросов парниковых газов. Гораздо меньше внимания уделяется почвенной секвестрации атмосферного углерода.

Почва, накапливающая в три раза больше углерода, чем вся атмосфера, — это крупнейший земной поглотитель углерода, предлагающий огромное неиспользованное хранилище с очень большой емкостью. За период с зарождения земледелия и до наших дней в результате производства продовольствия из сельскохозяйственных земель была извлечена половина (или 133 Гт) когда-то накопленного углерода, и уровень потерь катастрофически увеличился за последние два столетия, создав пустоту, которую необходимо заполнить. Восстановление такого углеродного запаса за счет секвестрации было бы эквивалентно изъятию почти 1/5 атмосферного углерода и привело бы к снижению концентраций парниковых газов почти до уровня до начала промышленной революции, а почва стала бы менее подвержена эрозии. Если смотреть на вещи реалистично, восстановить все утраченное 133 Гт углерода в ближайшее время не удастся, но работа в этом направлении могла бы стать основной частью многостороннего плана по предотвращению эрозии почв и изменения климата.

Фермеры знают, что земля — больше не возобновляемый ресурс: на многих фермах почва просто выдохлась. По данным инвентаризации, проведенной в 2018 г. Министерством сельского хозяйства, в США скорость потери почв в десять раз превышает темпы почвообразования; в таких штатах, как Айова, Нью-Мексико и Невада,

скорость эрозии еще выше. В некоторых районах Африки и Азии темпы эрозии в 100 раз превосходят темпы восстановления почвы.

И ситуация ухудшается. Сильные ливни с ураганами — основная причина эрозии, поскольку они смывают и переносят частицы разрыхленной почвы в ручьи и реки. Во многих частях света, включая Средний Запад США, резко возросли частота и сила ливней с ураганами, и эта тенденция, по-видимому, будет усиливаться по мере ухудшения ситуации с изменением климата. При нынешней интенсивности эрозии некоторые из наиболее плодородных пахотных земель утратят большую часть пахотного слоя в течение следующих нескольких десятилетий и окажутся непригодными для производства продовольствия, в то время как численность населения Земли достигнет 9 млрд. На самом деле даже богатые земли Айовы настолько истощены, что по всему штату в некоторых местах обнажается подпочва. Однако существует общий принцип, на который стоит обратить внимание: интенсивность эрозии снижается за счет аккумуляции углерода в почве.

Секвестрация углерода в сельскохозяйственных почвах была целью инициативы «4 на 1000», предложенной Францией во время Парижской конференции по климату в 2015 г. и направленной на обеспечение продовольственной безопасности и борьбу с изменениями климата. Согласно плану, ежегодное повышение концентрации углерода в почве на 0,4% могло бы компенсировать выбросы в атмосферу в будущем. Соглашение подписали только 29 стран, но США среди них не оказалось. В плане учитывались все почвы на планете, поэтому он казался амбициозным, а цели — недостижимыми, что оттолкнуло многих потенциальных участников. Поэтому для того, чтобы инициатива «4 на 1000» больше соответствовала реальности, ее следовало бы сформулировать заново, сконцентрировав внимание тех, кто приступает к ее реализации, только на сельскохозяйственных землях. Поскольку президент Джо Байден намерен восстановить лидерство США в глобальной политике в области климата, одним из важных пунктов в его повестке дня должна быть ратификация соглашения о повышении содержания углерода в почве как можно большим числом стран.

Для достижения целей, касающихся почвенного углерода, США необходимо применять различные методы ведения сельского хозяйства. Один важный шаг — сокращение обработки земель вспашкой, приводящей к эрозии, поскольку в результате разрушаются крупные комки и уничтожается структура почвы, предотвращающая распад

и перемещение частиц. Альтернативой может быть система посева с нулевой обработкой почвы, когда вместо вспашки поля после сбора урожая и перед посевом и высева семян в пропаханные борозды семена высаживают на не вспаханном поле со стерней (*стерня, или жнивье, — нижняя часть стеблей зерновых, оставшаяся на корню после уборки урожая. — Примеч. пер.*) Хотя еще в 1970-х гг. было продемонстрировано, что технология нулевой обработки почвы существенно снижает интенсивность эрозии, ее применяют лишь на одной трети всех пахотных земель США. Еще один очень эффективный метод — высаживание покровных культур, то есть таких видов растений, которые обогащают почву в период между осенней уборкой урожая и весенним посевом основной культуры. Покровные культуры скрепляют почву и предотвращают удаление плодородного пахотного слоя под воздействием зимних ветров и весенних ливней.

Интенсивный восстановительный выпас воспроизводит эффект от воздействия стада бизонов, когда-то бродивших по американским равнинам и вносящих вклад в формирование ряда наиболее плодородных почв на планете

Почву пахотных угодий можно стабилизировать за счет промежуточных полос из многолетних прерий — тех самых видов растений, которые сформировали массивы почв Среднего Запада, обеспечивающие продовольствием с тех пор, как американцы — иммигранты из Европы переселились в центр страны в XIX в. Такие многолетние растения обладают мощной корневой системой, питающей почву. Например, корни проса прутьевидного (*Panicum virgatum*) могут проникать в почву на глубину до 4,3 м и к концу сезона составляют половину биомассы растения, то есть представляют собой своего рода резервуар, позволяющий растению опять дать побег весной. Кукуруза, наоборот, обладает развитыми поверхностными корнями, и к концу вегетационного периода, после того как растения доставят свой углерод в семена, остается незначительное количество корневой биомассы. Замена в посевах всего лишь 10% кукурузы на продуманно размещенные растения прерий снижает интенсивность эрозии на 95%! Лесовосстановление также уменьшает интенсивность эрозионных процессов, поскольку крупные корни деревьев скрепляют и обогащают почву. Все

перечисленные методы защиты почв ускоряют секвестрацию углерода, снижая накопление парниковых газов в атмосфере.

Другой способ увеличения секвестрации углерода — применение методов выпаса домашнего скота, стимулирующих рост растений. Интенсивный восстановительный выпас воспроизводит эффект от воздействия стад бизонов, когда-то бродивших по американским равнинам и вносящих вклад в формирование ряда наиболее плодородных почв на планете. Подобные режимы выпаса предполагают частый перегон скота (иногда несколько раз в день) на новое пастбище, для того чтобы животные не могли срывать растительность близко к земле. Оставшиеся растения быстрее восстанавливаются по сравнению с теми, что были съедены почти до основания, и начинают опять расти, в них активно протекает процесс фотосинтеза, такие растения аккумулируют больше углерода. По оценкам некоторых ученых, восстановительный выпас скота настолько повышает объемы фиксации углерода в результате фотосинтеза, что способен компенсировать выбросы парниковых газов при производстве говядины.

Почва, благоприятная для климата, как фирменный знак

Со временем содержание углерода в почве достигнет высоких значений. Но тогда может возникнуть другая проблема: это означало бы, что почва переполнена углеродом и поэтому здорова и устойчива к эрозии. Вероятно, к моменту, когда будет достигнуто максимальное содержание углерода в почвах по всему миру, стратегии по снижению выбросов углекислого газа станут более продвинутыми.

Критики инициативы «4 на 1000» утверждают, что выгоды от внедрения углерода в почву перечеркнет возросшая потребность в азотсодержащих удобрениях, которые производят в ходе процесса с высокими затратами ископаемого топлива. Но секвестрация углерода может сопровождаться сохранением азота в растительном материале, поэтому потребность в азоте у будущих культур будет снижаться. Более того, подобные потребности могут быть удовлетворены путем биологической фиксации азота, осуществляемой почвенными бактериями, которым не требуется ископаемое топливо для производства азотных удобрений.

У нас имеются средства для того, чтобы остановить потери почв и снизить выбросы парниковых газов, но необходимо проводить политику, позволяющую фермерам внедрять новые методы. Большинство ферм выживают за счет неустойчивого размера прибыли. Несмотря на то что в Америке уровень обеспечения дешевым и безопасным продовольствием — один из самых высоких в мире, фермеры получают всего лишь 15 центов с каждого доллара, потраченного на продукты, а в период с 2013 по 2018 г.

чистый доход сельского хозяйства упал почти на 50%. По прогнозам Минсельхоза США, половина американских ферм потеряет деньги в 2021 г. Многие фермы существуют только потому, что члены семьи обеспечивают доход за счет деятельности, не связанной с фермой. Кроме того, финансовые трудности приводят многие фермы к банкротству, о чем свидетельствует утрата половины молочных ферм США в период с 2001 по 2019 г.

Для того чтобы повысить рентабельность земледелия и снизить интенсивность эрозии и выбросы парниковых газов, администрация Байдена могла бы реструктурировать систему страхования урожая, уменьшив страховые взносы за земли, обрабатываемые с использованием методов, способствующих накоплению углерода в почве. Такая стратегия окупилась бы за несколько лет, потому что даже небольшое повышение содержания углерода в почве снижает уязвимость к воздействию засухи и наводнений и, следовательно, вероятность страховых выплат. Администрация могла бы создать объединение из основных заинтересованных лиц — фермеров, ретейлеров продуктов, потребителей, индейских общин, представителей агробизнеса и групп экологов — для разработки стратегий сертификации и маркетинга, чтобы продавать продукты с маркировкой, указывающей, что они были произведены в условиях, способствующих секвестрации углерода.

На этикетке может быть написано «Произведено героическими борцами с выбросами CO₂», чтобы отдать должное подвигу фермеров, которые обеспечивают продуктами миллионы людей, а теперь еще и помогают защитить планету. Международные продуктовые торговые сети могли бы требовать от изготовителей применения указанных методов ведения сельского хозяйства, как уже происходит в отношении способов производства, обеспечивающих защиту животных и окружающей среды. Существующие в настоящее время субсидии на сельское хозяйство можно было бы перенаправить на поддержку такого производства продуктов, в ходе которого осуществляется секвестрация углерода.

США пережили последствия тяжелой деградации почв во время пыльных бурь 1930-х гг. Можно предотвратить подобное опустошение пахотных земель, изменив методы ведения сельского хозяйства, которые принесли бы дополнительную пользу в борьбе с изменениями климата. Ставки слишком высоки, чтобы игнорировать роль почвы. ■

Перевод: С.М. Левензон

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Риганолд Д., Хаггинс Д. Беспашотная обработка почвы: тихая революция // ВМН, № 10, 2008.

Editor in Chief:

Laura Helmuth

Copy Director:

Maria-Christina Keller

Creative Director:

Michael Mraz

Managing Editor:

Ricki L. Rusting

Chief Features Editor:

Seth Fletcher

Chief News Editor:

Dean Visser

Chief Opinion Editor:

Michael D. Lemonick

Senior Editors:

Mark Fischetti, Josh Fischman, Clara Moskowitz,

Madhusree Mukerjee, Jen Schwartz, Kate Wong

Associate Editors:

Gary Stix, Lee Billings, Sophie Bushwick,

Andrea Thompson, Tanya Lewis, Sarah Lewin Frasier

Editors Emeriti:

Mariette DiChristina, John Rennie

Contributing Editors: Gareth Cook, Lydia Denworth, Ferris Jabr, Anna Kuchment,

Robin Lloyd, Melinda Wenner Moyer, George Musser, Ricki L. Rusting

Art Contributors: Edward Bell, Zoë Christie, Lawrence R. Gendron, Nick Higgins

Art Director: Jason Mischka

Senior Graphics Editor: Jen Christiansen

President: Dean Sanderson

Executive Vice President: Michael Florek

Vice President, Commercial: Andrew Douglas

Publisher and Vice President: Jeremy A. Abbate

© 2021 by Scientific American, Inc.

В мире науки

SCIENTIFIC AMERICAN

Оформить подписку на журнал «В мире науки» можно:

в почтовых отделениях по каталогам:

«Роспечать», подписной индекс:

81736 — для физических лиц,

19559 — для юридических лиц;

«Почта России», подписной индекс:

16575 — для физических лиц,

11406 — для юридических лиц;

«Пресса России», подписной индекс: 45724,

www.akc.ru

по РФ и странам СНГ:

ООО «Урал-Пресс»,

www.ural-press.ru

СНГ, страны Балтии и далее зарубежье:

ЗАО «МК-Периодика»,

www.periodicals.ru

РФ, СНГ, Латвия:

ООО «Агентство "Книга-Сервис"»,

www.akc.ru

Читайте в следующем номере

Почему животные играют

Резвясь, животные совершенствуют физическую форму и когнитивные способности, развивая навыки, необходимые для выживания и размножения.

Не совсем звезды

Коричневые карлики мерцают на границе между звездами и планетами; именно поэтому они могут помочь нам достичь ясности в отношении и тех и других.

Новое понимание болезни Альцгеймера

Перспективной мишенью для исследователей стали иммунные клетки, называемые микроглией.

Квантовое будущее химии

Квантовые компьютеры выведут молекулярное моделирование на новый уровень точности, снизив зависимость ученых от интуиции и случайности.

Заикающийся разум

Исследования генетических и неврологических причин распространенного расстройства речи указывают на новые методы его лечения.

Институт, стертый из истории

Берлинскому Институту сексологии исполнилось бы 100 лет, если бы он не был уничтожен нацистами.

Год, когда исчез грипп

Меры, направленные на замедление распространения COVID-19, по сути, победили грипп.





СЕНТЯБРЬ 1971

Метрическая мечта. Предложение о переходе США на метрическую систему было направлено в Конгресс США министром торговли Морисом Стэнсом (Maurice Stans). В нем приняты рекомендации, сделанные в отчете Национального бюро стандартов, где введение метрической системы названо «решением, чье время пришло». США — единственная крупная страна, в которой не используется метрическая система. Представляется, что переход Америки на метрическую систему, говорится в отчете, желателен с точки зрения участия страны в мировой торговле. Если конгресс примет это предложение, переход состоится через десять лет. Первоочередная задача — научить детей и население США думать в терминах метрической системы.

Галактические радикалы. Та же самая самая простая молекула, которая была впервые обнаружена в межзвездных просторах нашей Галактики восемь лет назад, найдена и в двух других галактиках на расстоянии примерно 10 млн световых лет от нас. Это гидроксильный радикал — *ОН*. Радиointерферометрия показывает, что он присутствует в *M82* (галактика Мессье 82, или Сигара), взрывающейся галактике в созвездии Большой Медведицы, и в *NGC 253* (галактика Скульптор, или Серебряная Монета), небольшой спиральной галактике в созвездии Скульптор. Очевидно, концентрация гидроксильных радикалов примерно один на миллион атомов водорода в межзвездных облаках — приблизительно такая же, как и в Галактике.



СЕНТЯБРЬ 1921

Радиосигналы с Марса. Цикл шумихи о радиосигналах с Марса повторяется каждые несколько лет. Газеты пестрят заголовками о перехвате загадочных сигналов. Дж. Макбет (J.H.C. Macbeth), лондонский руководитель компании *Marconi Wireless Telegraph Company, Ltd.*, недавно

заявил: Гульельмо Маркони убежден, что он перехватил сигналы, имеющие чрезвычайно большую длину волны. Верится в это с трудом. Радиосвязь — настолько сложная область техники, что было бы редчайшей удачей, если бы существа, обитающие на разных планетах, разработали в точности одинаковый метод связи. Легче поверить в то, что для привлечения нашего внимания марсиане использовали бы огромные отражающие свет зеркала или даже гигантские прожекторы.

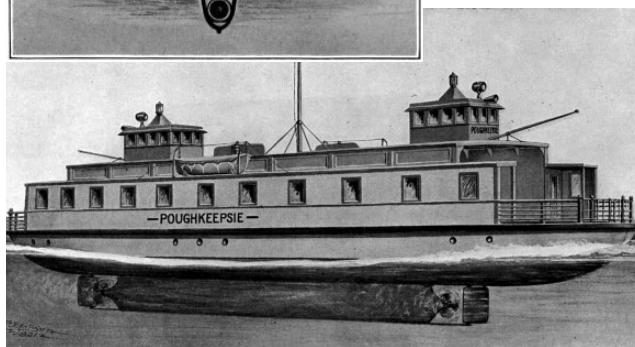
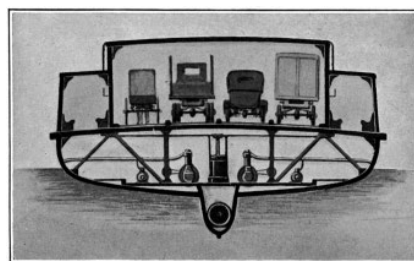
SciAm стал ежемесячным. Еженедельное издание *Scientific American* и *Scientific American Monthly* будут объединены в один ежемесячный журнал *Scientific American*. Первый номер будет датирован ноябрем 1921 г. В новом журнале будет больше текстов, больше иллюстраций и более широкий круг тем. Мы признаемся, что, выпуская журнал *Scientific American* неделя за неделей более трех четвертей века, сегодня мы чувствуем боль сожаления. Однако это сделано для того, чтобы мы могли представить те же материалы в более сбалансированной и удобоваримой форме по гораздо меньшей цене для читателя. Новый журнал охватит все области науки, техники и промышленного прогресса. Стоимость подписки — \$4 в год, цена номера — 35 центов.



СЕНТЯБРЬ 1871

Злобная рыба. Среди живых существ, населяющих воды земного шара, есть прекрасные, несуразные и вселяющие страх. К последнему классу относится рыба-скорпион. Она наносит раны своим зубчатым спинным плавником, и никто не осмеливается прикоснуться к ней рукой, пока плавник не обломают палкой. Рыба кандиру (или ванделлия) изобилует в устье Амазонки.

Размером едва ли крупнее плоточки, этот маленький злодей, вцепившись в плоть, держится так стойко, что удалить его можно лишь вместе с куском мяса. Еще одна рыба южноамериканских рек — паюра (скупбриевидный гидролик). В ее нижней челюсти расположены два зуба, которыми она наносит глубокую рану, разрезая так же гладко, как бритва. ■



Автомобильный паром. Рост числа автомобилей и грузовиков привел к появлению парома нового типа — с корпусным килем; его длина всего чуть более 40 м, а несет он 144 м въездных путей, 1921 г.



МИНОБРНАУКИ
РОССИИ



МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
М.В.ЛОМОНОСОВА



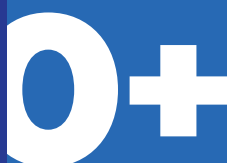
Правительство
Москвы



РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК

ВСЕРОССИЙСКИЙ ФЕСТИВАЛЬ НАУКИ НАУКА +

ОКТАБРЬ –
НОЯБРЬ
2021



ВХОД
СВОБОДНЫЙ



FESTIVAL
NAUKI.
RU

ГЕНЕРАЛЬНЫЕ
ПАРТНЕРЫ

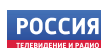


Ростех

СТРАТЕГИЧЕСКИЙ
ПАРТНЕР



ГЕНЕРАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПАРТНЕРЫ



В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Ежемесячный
научно-информационный
журнал

www.sci-ru.org

8/9 2021

12+

ЗАЩИТИТЬ ЗЕМЛЮ ОТ АСТЕРОИДОВ // ДОКЕМБРИЙ В СИБИРИ И В МИРЕ

СЛЕДУЮЩАЯ СМЕРТЕЛЬНАЯ ЭПИДЕМИЯ

Растущая мировая угроза
грибковой болезни



ISSN 0208-0621



21008

9 770208 062001