

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Ежемесячный
научно-информационный
журнал

www.sci-ru.org

10 2020

12+

САМОИЗОЛЯЦИЯ В МИРЕ ЖИВОТНЫХ // ЧУМАКОВЫ: ДИНАСТИЯ ВИРУСОЛОГОВ

ВОЗНЕСЕНИЕ ДУБОВ

Как эти деревья стали
доминировать в лесах
Северной Америки





26



4

Темы номера

ЭВОЛЮЦИЯ

Расцвет дубов

Джэини Кавендер-Бэрес, Пол Манос и Эндрю Хипп
История о том, как могучие деревья стали доминировать в лесах Северного полушария планеты

ВИРУСОЛОГИЯ

Вирусы: в прекрасном и яростном мире

Наталья Лескова
Братья **Петр** и **Константин Чумаковы** — представители династии, уже много десятилетий занимающейся вопросами фундаментальной и прикладной биологии и медицины

ЭКОЛОГИЯ

Животные порознь

Джулия Бак и Дана Холи
Лангусты, птицы и некоторые приматы используют социальное дистанцирование, чтобы предотвратить заболевание, тогда как люди испытывают трудности с такой стратегией



100

СОДЕРЖАНИЕ

Октябрь 2020

ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

4 Белое и черное золото Карелии 34

Валерий Чумаков
Председатель Карельского научного центра РАН член-корреспондент РАН **Ольга Бахмет** — о том, как наука старается помочь возродить бывшие бренды региона и создать новые



14 ЭКОНОМИКА 42

Измерить то, что важно

Джозеф Стиглиц
Одержимость ВВП привела к снижению уровня счастья, ухудшению здоровья и некорректной оценке состояния окружающей среды. По мнению ученых, пришло время заменить этот показатель



26 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА 52

Квантовый скачок

Спиридон Михалакис
Поиск решения одного из важнейших остающихся открытыми вопросов в физике: каким образом квантовое явление становится макроскопическим?

82





42



90

МИКРОСКОПИЯ

Разглядеть невидимое

Наталья Лескова

Ученые из НИЦ «Курчатовский институт» рассказывают о перспективах современной микроскопии

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

64 Проблема биомассы 90

Деннис Гэррити и Эрик Тоенсмейер

Стратегии по сокращению углекислого газа предполагают большее количество деревьев, трав и остатков сельхозкультур, чем можно сохранить на Земле



ЭНЕРГЕТИКА

Водородная альтернатива

Анастасия Пензина

В XXI в. необходимы новые виды энергии, и главный кандидат — водород. Однако пока водородную энергетику рано считать экологичной и тем более дешевой. Почему?

ХИМИЯ

74 Скрытая цена лесных пожаров 100

Кайл Дикман

Поскольку ситуация с лесными пожарами по всему миру ухудшается, попытаемся выяснить, как выбросы от них влияют на здоровье человека



АНТРОПОЛОГИЯ

Выживут только дружелюбные

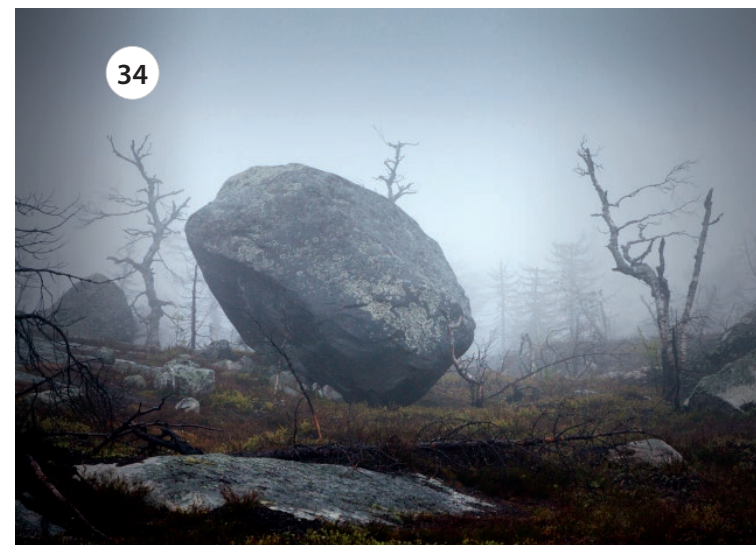
Ванесса Вудз и Брайан Хэар

Естественный отбор наиболее дружелюбных и общительных особей позволил человеку разумному одержать верх над неандертальцами и прочими видами людей и покорить планету

Разделы

82 От редакции 3

50, 100, 150 лет тому назад 112



34



14

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Наши партнеры:



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



РОСАТОМ



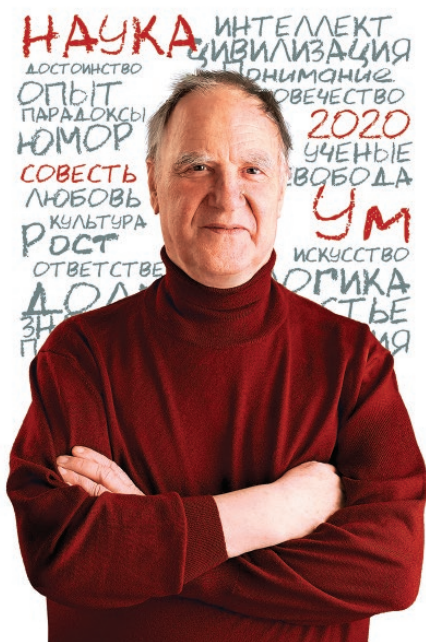
Сибирское отделение РАН



очевидное
невероятное



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



Учредитель и издатель:

Некоммерческое партнерство «Международное партнерство
распространения научных знаний»

Главный редактор:

В.Е. Фортвов

Главный научный консультант:

президент РАН акад. А.М. Сергеев

Ответственный секретарь:

О.Л. Беленицкая

Зав. отделом иностранных материалов:

А.Ю. Мостинская

Шеф-редактор иностранных материалов:

В.Д. Ардаматская

Зав. отделом российских материалов:

О.Л. Беленицкая

Выпускающий редактор:

М.А. Янушкевич

Обозреватели:

В.С. Губарев, В.Ю. Чумаков

Администратор редакции:

О.М. Горлова

Научные консультанты:

член-корр. РАН О.Н. Бахмет; д.х.н. Ю.А. Добровольский; д.ф.-м.н. С.В. Рогожкин;
д.б.н. К.М. Чумаков; член-корр. РАН П.М. Чумаков; д.ф.-м.н. А.А. Яковлев

Над номером работали:

А.А. Алеев, Е.В. Аржевский, А.П. Кузнецов, С.М. Левензон, Н.Л. Лескова, А.А. Никитин,
А.В. Овчаров, А.С. Паевский, А.И. Пензина, А.И. Прокопенко, В.И. Сидорова, Д.С. Хованский,
А.В. Щеглов

Дизайнер:

Д.А. Гранков

Верстка:

А.Р. Гукасян

Корректур:

Я.Т. Лебедева

Фотографы:

И.Ф. Бадиков, Н.Н. Малахин, Н.А. Мохначев

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

В.Е. Фортвов

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. Калинкина

Адрес редакции:

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

Отпечатано:

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

Заказ № 0121

© 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.

Уроки природы

Пандемия COVID-19 вынудила многих людей уехать из городов на дачи, проводить больше времени на открытом воздухе, любясь цветами и деревьями. Статья «Расцвет дубов», иллюстрация к которой вынесена на обложку номера, поможет вам узнать, что за последние 56 млн лет эволюция привела к появлению 435 видов дуба, обладающих сложными механизмами адаптации к окружающей среде, которые позволили им успешно произрастать в различных средах обитания по всему миру.

Тема вирусных заболеваний по-прежнему остается одной из центральных. В этом номере вы можете прочитать интервью продолжателей династии выдающихся вирусологов, чей вклад в отечественную науку и медицину невозможно переоценить. П.М. и К.М. Чумаковы рассказывают о своем отце — академике М.П. Чумакове, который спас мир от эпидемии полиомиелита, и матери — члене-корреспонденте АМН СССР М.К. Ворошиловой, авторе концепции полезных вирусов человека, а также о собственных уникальных разработках в этой области. Статья называется «Вирусы: в прекрасном и яростном мире».

Человек с давних пор мечтал познать окружающий его, но невидимый невооруженным глазом мир. Попытки создать прибор, позволяющий разглядеть невидимое, предпринимались еще в XVI–XVII вв. Созданные сегодня электронные микроскопы дают возможность изучить



структуру исследуемых объектов вплоть до атомарных размеров. Зачем это нужно, читайте в статье «Разглядеть невидимое».

Использование природных углеводов привело к весьма неприятным последствиям для окружающей среды — от смога над крупными городами до парникового эффекта. Ученые ищут новые виды энергии, которые не будут наносить вред природе. В материале «Водородная альтернатива» исследуется вопрос, станет ли водородная энергетика выходом из сложившейся ситуации.

«Лангусты, птицы и некоторые приматы обычно используют социальное дистанцирование, чтобы предотвратить заболевание, тогда как люди испытывают трудности с такой стратегией», — пишут авторы статьи «Животные порознь». Действительно, многие животные могут распознавать болезни и практикуют социальную изоляцию, чтобы не заразить других в своей группе. Вот такие уроки дает нам природа, показывая, что навыкам выживания при пандемии мы можем научиться у других видов. ■

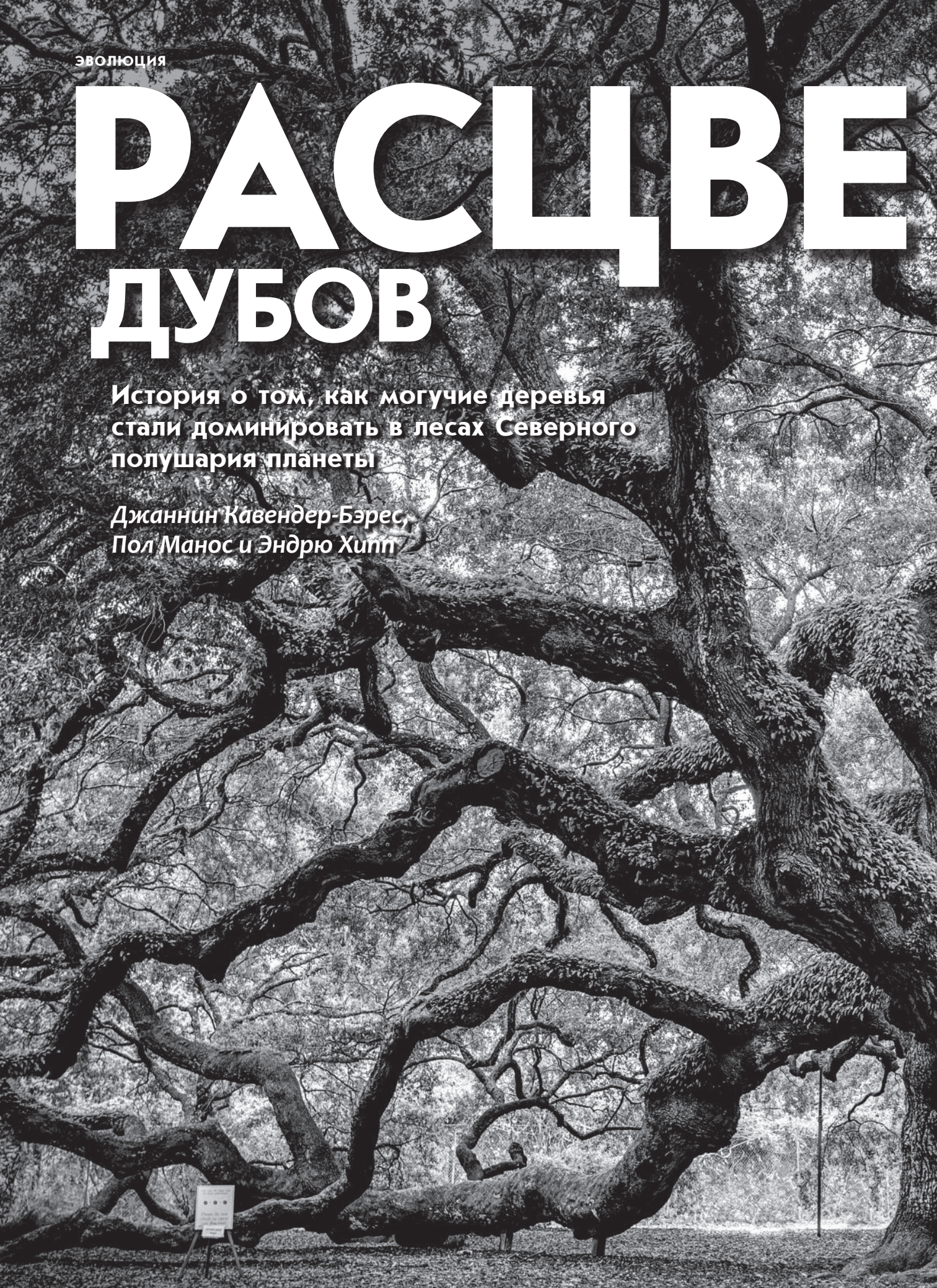
**Редакция журнала
«В мире науки / Scientific American»**

ЭВОЛЮЦИЯ

РАСЦВЕ ДУБОВ

**История о том, как могучие деревья
стали доминировать в лесах Северного
полушария планеты**

*Джаннин Кавендер-Бэрес,
Пол Манос и Эндрю Хипп*



T

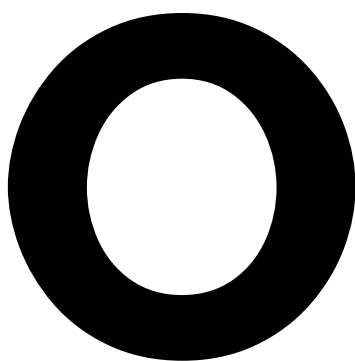
Дуб ангелов — виргинский дуб (*Quercus virginiana*), растущий на острове Джонс, штат Южная Каролина. Ученые оценивают возраст дерева в 400–500 лет.

ОБ АВТОРАХ

Джаннин Кавендер-Бэрес (Jeannine Cavender-Bares) — профессор Миннесотского университета, изучает происхождение, организацию и значение биоразнообразия растений, уделяя особое внимание дубам.

Пол Манос (Paul S. Manos) — профессор Дьюкского университета, изучает систематику и биогеографию цветковых растений, эволюцию дубов, карий и грецкого ореха.

Эндрю Хипп (Andrew L. Hipp) — старший научный сотрудник и директор гербария Дендрария Мортон в Лайле, штат Иллинойс. Область научных интересов — эволюция, разнообразие растений, филогеномика дубов.



казавшись в каком-нибудь уголке Северной Америки 56 млн лет назад, вы наверняка не узнали бы эту часть света. В те далекие времена, в самом начале эоценовой эпохи, климат на Земле был намного теплее и гораздо более влажным, чем сегодня. Центральная часть материка, где недавно плескалось мелководное море, только что превратилась в бескрайние Великие равнины, но Скалистые горы еще не достигли окончательной высоты. Разительно отличались от современных и древние флора и фауна континента.

Канадская Арктика, покрытая сегодня сравнительно скудной тундровой порослью, утопала в пышной и разнообразной растительности: температура воздуха здесь круглый год оставалась выше нуля. На Элсмире, самом северном канадском острове, расположенном у северо-западного побережья Гренландии, жили аллигаторы и гигантские черепахи. А на территории современной юго-восточной части США господствовал тропический дождевой лес, населенный многочисленными приматами. На северо-востоке современных США раскинулись широколиственные вечнозеленые леса и массивы листопадных лесов, состоявших из гинкго, берез, вязов, калины и других деревьев и кустарников. Широколиственные листопадные леса, которые в наши дни занимают примерно 11% территории Северной Америки к северу от Мексики, едва начали формироваться. Но вскоре эта

картина изменится: произойдут стремительное распространение и диверсификация дубов — растений, которым суждено стать одними из самых экологически и экономически значимых деревьев планеты.

За 56 млн лет своего существования на Земле дубы (род *Quercus*) прошли долгий путь эволюционного развития от одной-единственной недифференцированной популяции до 435 видов деревьев и кустарников, произрастающих сегодня на пяти континентах планеты от Канады и Норвегии на севере до Колумбии и острова Калимантан на юге. Дубы — ключевые виды растений, обеспечивающие нормальное функционирование огромных лесных массивов в Северном полушарии и поддерживающие нормальную жизнедеятельность самых разных организмов — от грибов и насекомых до птиц и млекопитающих. Они очищают воздух, поглощая

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Дуб — разнообразная и широко распространенная группа (род) деревьев и кустарников, нередко представляющих собой ключевые древесные породы в населяемых ими лесах.
- Достижения в области геномики позволили ученым воссоздать эволюционную историю дубов.
- Их открытия помогут людям обеспечить выживание дубов в условиях глобального потепления климата.

углекислый газ и содержащиеся в атмосфере вредные химические соединения. Дубы оказали огромное влияние на формирование человеческой культуры: они кормили людей и домашних животных своими плодами (желудями) и дарили древесину для сооружения домов, мебели и кораблей. Дубы играли настолько важную роль в нашей жизни, что люди столетиями с благодарностью увековечивали их в сказках, мифах и легендах.

Дубы особенно широко распространены в Северной и Южной Америке, где произрастает примерно 60% их видов. Столь впечатляющее разнообразие, а также тот факт, что в Северной Америке и Мексике на долю дубов приходится больше лесной древесной биомассы, чем на долю какого-либо иного рода древесных растений, заставляет считать их наиболее важной группой деревьев в лесах этого континента. Чтобы понять жизнь этих лесов — их биоразнообразие, пищевые сети, влияние на климат, окружающую среду и т.д., — прежде всего необходимо выяснить, каким образом в них стали «верховодить» дубы. Долгие десятилетия ученые могли лишь строить предположения об эволюционной истории дубов. Это было связано со значительными пробелами в их ископаемой летописи и слабым развитием биомолекулярных методов, широко используемых сегодня для изучения эволюции живых существ по их ДНК. Однако недавние достижения в области расшифровки и анализа генома позволили нам и нашим коллегам детально воссоздать картину происхождения, диверсификации и расселения дубов. В результате мы получили историю фантастического эволюционного успеха отдельной группы растений — историю, которая поможет нам предсказать, как сложится судьба этих замечательных деревьев в условиях быстро меняющегося климата, а также разработать меры по обеспечению их выживания.

Красные и белые

Различия между представителями основных групп дубов легко заметит даже несведущий в ботанике человек. В Северной и Южной Америке преобладают дубы двух эволюционных линий (секций).



У красных дубов вершины лопастей заостренные (1), у белых дубов они округлые (2)

Одна из них представлена группой так называемых красных дубов, включающей виды, у которых лопасти листьев заканчиваются заостренными верхушками. У большинства видов этой группы дубов плоды (желуди) развиваются не менее года, так что на дереве, опыленном в текущем году, они созревают лишь на следующий год. У видов, относящихся к так называемой группе (секции) белых дубов, лопасти листьев округлые. Кроме того, в сбрасываемой на землю листве белых дубов содержится больше питательных веществ, чем в листьях красных дубов, а желуди большинства их видов созревают в тот же год, когда произошло оплодотворение женских цветков. Иногда желуди белых дубов, прежде чем упасть на землю, прорастают прямо на ветках деревьев. Серые белки охотнее запасают желуди красных дубов, потому что портятся они гораздо медленнее, чем желуди белых дубов.

И, наконец, белые дубы способны быстро и эффективно закупоривать полые трубки (сосуды), по которым в их стволах перемещается от корней к листьям вода, так называемыми тиллами — пузырьвидными выростами особых клеток в древесине. Перекрыв сосуд такой «пробкой», дерево останавливает распространение по стволу смертельно опасных грибковых и других инфекций. У красных дубов закупорка сосудов происходит более медленно и не столь полно.

Вот почему корабли и бочки, изготовленные из древесины белых дубов, служат людям дольше, чем из древесины красных: она лучше сопротивляется разрушительному действию воды. Грызущие насекомые, питающиеся древесиной, прекрасно распознают красные и белые дубы; большинство из этих существ приспособлены к питанию тканями дубов лишь определенной группы. Похоже, в группах дубов отлично ориентируются даже грибы, образующие микоризу с корнями деревьев: многие из них предпочитают вступать в симбиотические отношения либо с белыми, либо с красными дубами.

Но близкородственные виды дубов, относящиеся к одной и той же их группе (секции), распознать порой непросто. Внутривидовые различия между отдельными деревьями, отражающие как

Дубовый марш

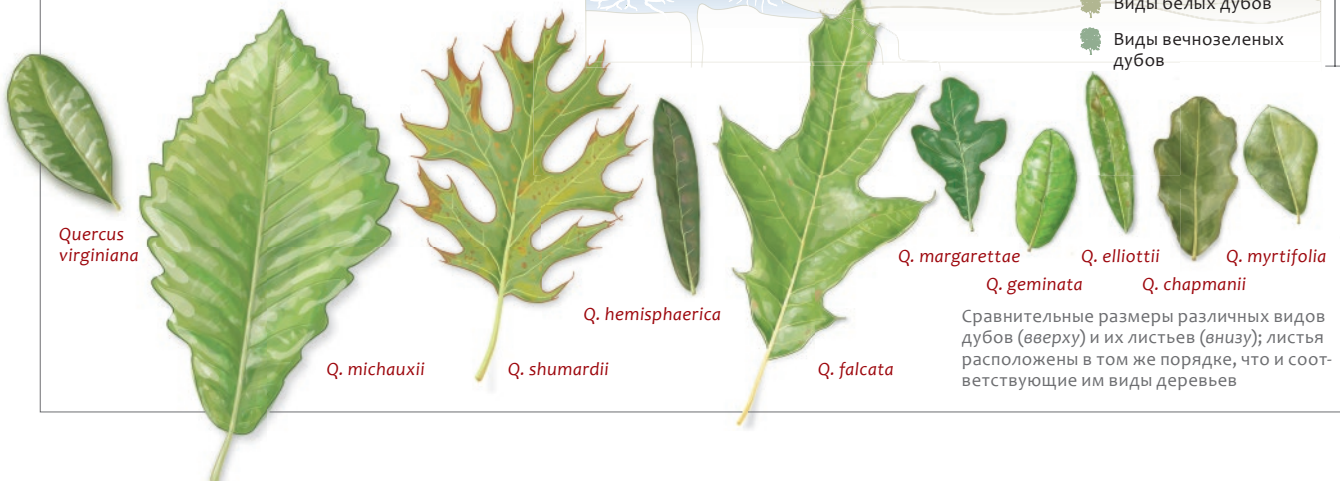
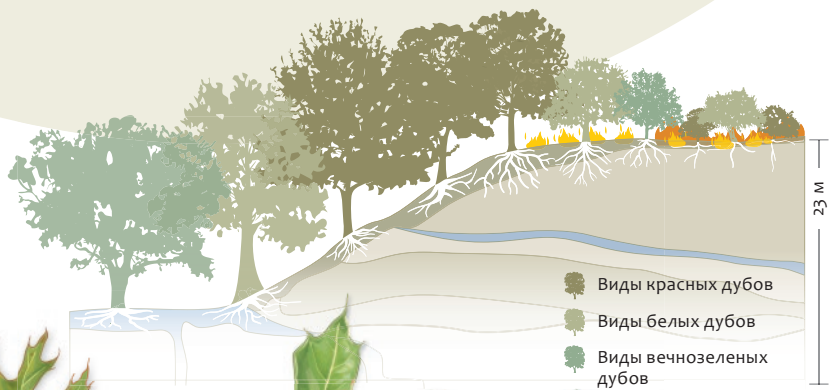
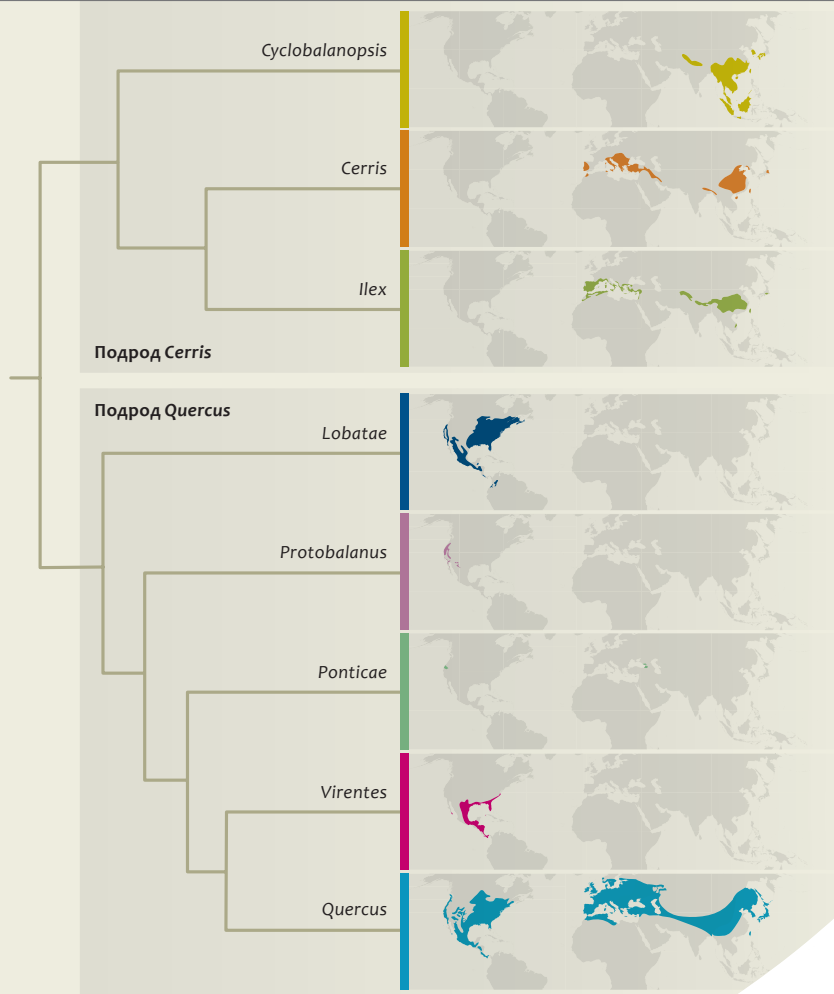
Дубы возникли более 56 млн лет назад и со временем дали множество видов деревьев и кустарников, 435 из которых произрастают сегодня на пяти континентах планеты. Анализ геномов позволил ученым воссоздать историю видообразования у этих растений. Обнаруженные факты помогают объяснить высокое видовое разнообразие дубов, особенно в Северной и Южной Америке, где обитает примерно 60% всех их видов.

Классификация дубов

Все современные виды дубов — представители рода дуб (*Quercus*), включающего восемь основных линий (секций) растений. В Америке доминируют дубы, относящиеся к двум из этих линий: красные дубы (*Lobatae*) и белые дубы (*Quercus*).

Разнообразие сообществ

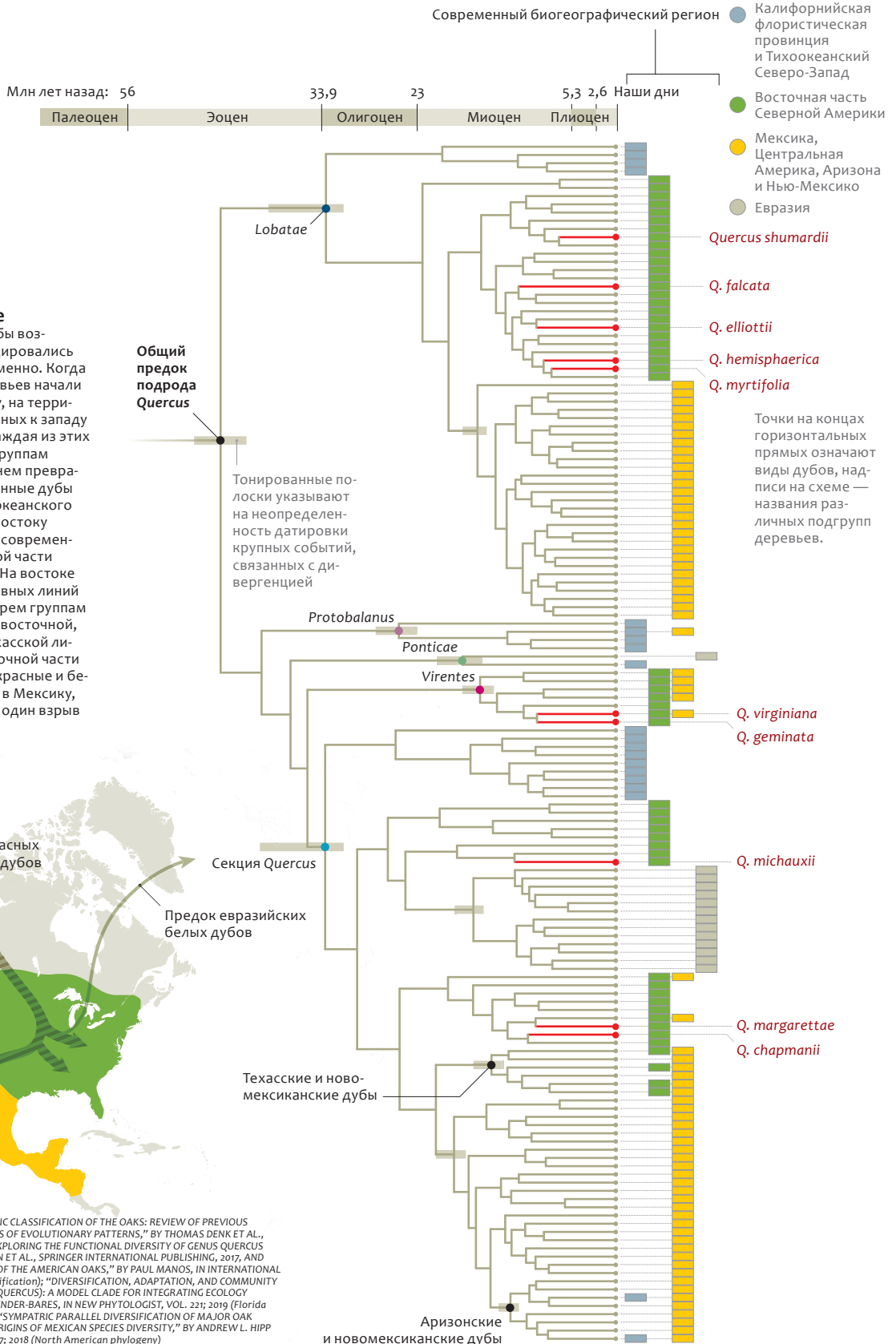
Красные и белые дубы нередко растут бок о бок в одних и тех же местообитаниях. Представители этих двух линий колонизировали одни и те же области и по-своему решают одни и те же экологические проблемы. На флоридских равнинах различные виды белых дубов отделены друг от друга барханами, кустарниковыми пустошами и оврагами, образовавшимися в результате карстовых процессов и природных пожаров. Такую же закономерность обнаруживают красные дубы и представители третьей линии — вечнозеленые дубы (*Virentes*). Структурирование этих дубовых сообществ обусловлено доступностью почвенной влаги и интенсивностью природных пожаров.



Сравнительные размеры различных видов дубов (вверху) и их листьев (внизу); листья расположены в том же порядке, что и соответствующие им виды деревьев

Дубы в Америке

Белые и красные дубы возникли и диверсифицировались в Америке одновременно. Когда эти две группы деревьев начали перемещаться к югу, на территориях, расположенных к западу от Скалистых гор, каждая из этих линий дала начало группам деревьев, со временем превратившихся в современные дубы Калифорнии и Тихоокеанского Северо-Запада, а к востоку от Скалистых гор — современным дубам восточной части Северной Америки. На востоке каждая из этих основных линий дубов дала начало трем группам деревьев — северо-восточной, юго-восточной и техасской линиям. Затем из восточной части Северной Америки красные и белые дубы двинулись в Мексику, где претерпели еще один взрыв видообразования.



SOURCES: "AN UPDATED INFRAGENERIC CLASSIFICATION OF THE OAKS: REVIEW OF PREVIOUS TAXONOMIC SCHEMES AND SYNTHESIS OF EVOLUTIONARY PATTERNS," BY THOMAS DENK ET AL., IN OAKS PHYSIOLOGICAL ECOLOGY: EXPLORING THE FUNCTIONAL DIVERSITY OF GENUS QUERCUS L. EDITED BY EUSTAQUIO GIL-PELEGRIN ET AL., SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING, 2017; AND "SYSTEMATICS AND BIOGEOGRAPHY OF THE AMERICAN OAKS," BY PAUL MANOS, IN INTERNATIONAL OAKS, VOL. 27; 2016 (ranges and classification); "DIVERSIFICATION, ADAPTATION, AND COMMUNITY ASSEMBLY OF THE AMERICAN OAKS (QUERCUS): A MODEL CLADE FOR INTEGRATING ECOLOGY AND EVOLUTION," BY JEANNINE CAVENDER-BARES, IN NEW PHYTOLOGIST, VOL. 221; 2019 (Florida schematic); HILARY MAJOR (leaves); "SYMPATRIC PARALLEL DIVERSIFICATION OF MAJOR OAK CLADES IN THE AMERICAS AND THE ORIGINS OF MEXICAN SPECIES DIVERSITY," BY ANDREW L. HIPPE ET AL., IN NEW PHYTOLOGIST, VOL. 217; 2018 (North American phylogeny)

пластические реакции растений на состояние окружающей среды, так и их генетические особенности, нередко выражены столь же сильно, как и межвидовые различия. Кроме того, виды, относящиеся к какой-либо одной из восьми ныне существующих основных групп дубов (красным, белым и т.д.), охотно скрещиваются друг с другом. Эти два фактора — высокая внутривидовая вариабельность и постоянная межвидовая гибридизация — сильно усложняют классификацию дубов.

Гибридизация порождает еще одну проблему: она затрудняет воссоздание эволюционной истории дубов с помощью традиционных биомолекулярных методов, предполагающих секвенирование одного или нескольких генов, потому что отдельный ген нередко отражает определенное событие эволюционной истории вида. Кроме того, один и тот же вид дуба может образовывать гибриды с множеством других видов дубов, так что различные гены его генома отражают различные аспекты этой истории, разворачивавшейся на всей площади видовых ареалов. Таким образом, геном любого дуба представляет собой мозаику, сформированную в результате видообразования и гибридизации.

20 лет назад ученым были известны нуклеотидные последовательности ДНК только хлоропластов (клеточных органелл растений, осуществляющих фотосинтез) и нескольких генов ядерной ДНК. Этого было вполне достаточно, чтобы получить общее представление о ветвистой структуре древа жизни дубов, но недостаточно для того, чтобы судить о структуре его концевых ветвей. В 2008 г. мы подумали, не помогут ли нам понять эволюционную историю дубов новые молекулярные технологии, используемые для изучения межвидовой гибридизации у красных дубов. С тех пор мы и наши коллеги по всему миру начали применять для расшифровки коротких участков ДНК особый подход, названный секвенированием ДНК, ассоциированной с сайтами рестрикции. Мы анализируем полученные данные с помощью статистических методов и реконструируем порядок, в котором различные виды дубов отделялись от общих предков, а также определяем, какие из этих видов подвергались гибридизации после обособления. Сопоставление результатов такого анализа с ископаемыми данными позволяет нам определить максимальный возраст ключевых событий



Ископаемый желудь из Орегона, датированный эоценовой эпохой

в эволюционной истории дубов. Несмотря на сложное эволюционное развитие этих деревьев, нам удалось реконструировать большую часть истории их видообразования.

С севера на юг

Вполне возможно, что мы никогда так и не узнаем, где и когда в точности появились на свет первые дубы, но нам известно, что примерно 56 млн

лет назад в местечке, расположенном неподалеку от современного Зальцбурга (Австрия), уже росла большая популяция дубов. Небольшое количество пыльцы деревьев попало в грязь, подверглось окаменению и сохранилось до наших дней. Эти пыльцевые зерна, имеющие форму мяча для игры в регби, с тремя продольными бороздками и вариабельной поверхностной текстурой служат самыми ранними ископаемыми свидетельствами существования дубов.

На всем протяжении раннего эоцена Северная Америка соединялась с Евразией сухопутными мостами, пересекавшими Атлантический и Тихий океаны, что позволяло растениям и животным свободно перемещаться между двумя этими континентами. Дубы, вероятно, были частью огромного леса, покрывавшего громадную территорию Северной Америки, Европы и Азии. А потому трудно сказать с уверенностью, возникли ли дубы в Евразии, а затем расселились в Америку, или наоборот. На вопрос: «Где родина современных дубов?» лучше всего отвечать: «На севере».

Как бы там ни было, почти сразу же после своего возникновения дубы начали разделяться на две основные группы; ареал одной охватывал Европу, Азию и Северную Америку, а другой — главным образом Северную и Южную Америку. Вначале распределение дубов по континентам было довольно «сумбурным». Например, древнейшие ископаемые останки дубов, у которых плюска («шапочка») желудя образована концентрическими кольцами деревянистых чешуек, были найдены в Орегоне и имеют возраст около 48 млн лет. Сегодня ареал дубов этой линии ограничен Юго-Восточной Азией. А красные дубы, считающиеся сегодня сугубо американской группой, были обнаружены в ископаемых отложениях Европы возрастом около 35 млн лет. Когда примерно 52 млн лет назад глобальная температура воздуха начала медленно снижаться, дубы стали мало-помалу перемещаться к югу — подалее от сухопутных мостов, периодически соединявших на протяжении предшествовавших 50 млн лет Евразию с Северной Америкой. По мере

того как похолодание климата истребляло северные популяции дубов, распределение этих деревьев по двум континентам становилось все более четким: в Северной и Южной Америке перестают встречаться виды евразийской группы, а в Евразии сохраняется только две ветви американской линии.

Прежде чем окончательно переместиться далеко на юг, дубы успели разделиться на восемь основных линий, представителей которых мы и встречаем в современных лесах планеты. Распространение трех из этих линий ограничено Северной и Южной Америкой: это красные, золоточешуйчатые и южные вечнозеленые дубы. Одна линия, белые дубы, возникла и образовала множество видов в Америке, но распространилась и в Евразию. Одни из древнейших американских окаменелостей этих деревьев представлены останками белого дуба возрастом 45 млн лет, найденными на необитаемом острове Аксель-Хейберг на севере Канадского архипелага и сильно отличающимися от красных дубов и прочих основных линий этих деревьев. Но принадлежность к той или иной линии ископаемых останков дубов, относящихся к начальной стадии диверсификации этих деревьев, по внешним признакам определить очень сложно, а потому мы воспользовались для этого методами молекулярного анализа. Комбинируя данные с результатами изучения окаменелостей, мы показали, что разделение дубов на восемь основных линий произошло на ранних этапах их эволюции. Этот факт представляет большую важность, так как он во многом объясняет события, произошедшие после того, как североамериканские дубы претерпели настоящий взрыв видообразования.

Территории возможностей

С глобальным снижением температур климат Северной Америки становился все более сезонным. Скалистые горы продолжали расти, превращая Великие равнины в дождевую тень (место с низким количеством осадков). Массивы тропических и широколиственных вечнозеленых лесов, прежде покрывавших почти всю Северную Америку, постепенно сокращались и примерно 40 млн лет назад оказались на грани исчезновения. В ископаемом материале, датированном 35 млн лет назад, окаменелые пыльца и листья дуба стали встречаться гораздо чаще: к этому времени под влиянием похолодания и усиления сезонности климата Северная Америка к северу от Мексики превратилась из тропического региона в край с умеренно континентальным климатом. После того как под влиянием климатических изменений тропические леса в Северной Америке исчезли, здесь открылись широчайшие экологические возможности для эволюции дубов.

Красные и белые дубы двинулись в южном направлении на освободившиеся земли; на территориях, расположенных к западу от Скалистых гор, каждая из этих линий дала начало группам деревьев, со временем превратившихся в современные дубы Калифорнии и Тихоокеанского Северо-Запада, а к востоку от Скалистых гор — современным дубам восточной части Северной Америки. На востоке каждая из этих основных линий дубов дала начало трем группам деревьев — северо-восточной, юго-восточной и техасской линиям. Затем, в интервале между 10 и 20 млн лет назад, из восточной части Северной Америки красные и белые дубы начали расселяться (возможно, через Техас) в Мексику.

Во всех упомянутых выше областях похолодание и усиливающаяся неоднородность климата вытеснили пальмы и широколиственные вечнозеленые деревья на юг или частично или полностью уничтожили их. Высвободившиеся в результате земли дали дубам отличную возможность для увеличения своего разнообразия (диверсификации) за счет адаптивной радиации, когда формирующиеся новые виды быстро заполняют пространства, еще не занятые другими видами. При этом происходит все более сильное экологическое обособление молодых популяций растений, что ограничивает перенос генов между ними. Со временем популяции становятся репродуктивно изолированными и обмен генов между ними полностью прекращается. Затем в популяциях накапливаются генные мутации и хромосомные перестройки, что еще больше усиливает различия между ними. В конце концов популяции превращаются в новые виды.

Наиболее отчетливо процесс адаптивной радиации проявился в Мексике и Центральной Америке, где произрастает примерно 40% всех видов дубов. Как уже отмечалось, изначально дубы были адаптированы главным образом к прохладному климату; похолодание и усиление сезонности климата способствовало их распространению по всему континенту. Переселяясь в Мексику, дубы поднимались на высокие горные склоны, напомилавшие своим климатом умеренный биом, где протекала их эволюция. Столкнувшись с сильно выраженной топографической вариабельностью высокогорья, деревья тут же образовали множество репродуктивно изолированных популяций. «Лазая» вверх и вниз по горам, дубы были вынуждены приспосабливаться и к разным высотным уровням влажности.

Таким образом, ярко выраженное разнообразие дубов в Мексике связано, похоже, не с теплым местным климатом. И, поскольку все мексиканские дубы — сравнительно молодые виды деревьев, эта диверсификация сформировалась не в результате длительного эволюционного развития. По-видимому, когда дубы начали расселяться

в мексиканских горах, быстрые темпы видообразования у них были обусловлены адаптивной радиацией. А это значит, что если бы дубы смогли забраться в Скалистые горы и обосноваться здесь (то есть если бы им удалось выжить в условиях коротких вегетационных сезонов в сочетании с холодными зимами северных гор), то они, возможно, достигли бы столь же высокого видового разнообразия и в этом регионе. Просто эволюционное прошлое дубов делает их непригодными для выживания в таких суровых условиях. Исключение составляет лишь один представитель группы белых дубов, дуб Гэмбела (*Quercus gambelii*), да и тот встречается лишь в южной части Скалистых гор.

Не исключено, что марш-бросок дубов в южном направлении остановился из-за резкого снижения сезонности климата или сильной конкуренции со стороны тропических лесных растений: дубам едва удалось «перешагнуть» через Панамский перешеек и обосноваться на самом севере Южной Америки. Но наша история на этом не кончается. На самом деле путешествие дубов на юг происходило дважды. Поскольку к этому времени линии белых и красных дубов уже полностью разделились, их диверсификация в южных широтах происходила параллельно и независимо друг от друга. Две обособленные, но близкородственные линии деревьев пережили одни и те же события, описанные нами выше: перемещение к югу из северных регионов, разделение на две группы в области Скалистых гор, колонизация Мексики... Эта история отчасти позволяет объяснить высокое видовое разнообразие и изобилие дубов в Америке. Ведь отважившись на путешествие к югу, дубы, по сути дела, совершили его дважды!

Добрые соседи

Одним из наиболее важных и интересных аспектов нашего исследования стала интеграция данных о генетической структуре эволюционного древа дубов с результатами изучения физиологической адаптации этих деревьев к изменениям климата и окружающей среды. По мере перемещения к югу и диверсификации в различных регионах белые и красные дубы оказывались в сходных местообитаниях и были вынуждены по-новому решать одни и те же экологические проблемы. В результате мы нередко встречаем белые и красные дубы, растущие бок о бок в одних и тех же регионах. Так, на скудных каменистых почвах, на обрывах и в оврагах на востоке США можно встретить представителя группы белых дубов, дуб звездчатый (*Quercus stellata*), растущий рядом с дубом мэрилендским (*Quercus marilandica*) из группы (секции) красных дубов. А в горах Южной Аризоны знаменитый белый дуб аризонский (*Quercus arizonica*) нередко соседствует с красным дубом Эмори (*Quercus emoryi*).

Такое сосуществование разных видов дубов, характерное для лесных сообществ большей части США, обладает одной любопытной особенностью. Если виды дубов, находящиеся между собой в отдаленном родстве, часто произрастают вместе, то близкородственные виды дубов, принадлежащие к одной и той же линии, рядом друг с другом почти никогда не растут. Например, поднимаясь вверх в горах Чирикауа, находящихся в Южной Аризоне, можно заметить, как постепенно сменяют друг друга различные виды белых дубов, — и то же самое по мере продвижения вверх делают красные дубы. На равнинах Флориды различные виды белых дубов отделены друг от друга барханами, скрэбом (кустарниковыми зарослями) и оврагами, возникшими в результате карстовых процессов и природных пожаров. Такую же закономерность обнаруживают и красные дубы.

Что формирует этот паттерн сосуществования? На экологическую дифференциацию внутри групп белых и красных дубов отчасти влияет тот непреложный закон природы, что ни один биологический вид не способен освоить все типы местообитаний. Напротив, виды, как правило, стараются как можно лучше приспособиться лишь к какой-нибудь части доступного экологического пространства. Физиологические потребности заставляют дубы каждой линии дробить экологическое и климатическое пространство таким образом, чтобы по возможности исключить соседство близких родственников. Например, в горах Чирикауа близкородственные виды дубов разделяет вдоль высотного градиента различная способность адаптироваться к засухе. Виды, растущие у подножия гор, научились мастерски избегать засухи, сбрасывая листву в засушливые сезоны. А виды, живущие на высоких горных склонах, где влажность гораздо выше, приспособились к ежедневным колебаниям доступности влаги, научившись снижать содержание воды в листьях, не дожидаясь их повреждения.

Напротив, во Флориде с ее сравнительно плоским рельефом сообщества дубов структурируют такие факторы, как доступность почвенной влаги и интенсивность природных пожаров. Близкородственные виды обнаруживают в этих сообществах адаптивные компромиссы между скоростью роста и устойчивостью к засухе вдоль градиентов влажности и между толщиной коры и способностью к вегетативному размножению с помощью подземных побегов вдоль градиентов интенсивности пожаров. Подобные параллельные компромиссы встречаются как у белых, так и у красных дубов, по сути дела, по всей стране, причем деревья обеих линий с конвергентными признаками, как правило, растут вместе.

Представители различных линий дубов хорошо уживаются друг с другом в любых местообита-

ниях, потому что сильно разнятся своей восприимчивостью к болезням: соседство с дальними родственниками менее чревато эпидемиями, поскольку красные и белые дубы страдают разными недугами. Кроме того, имеются даже данные о том, что дубы помогают друг другу осваиваться на новом месте, создавая такую почвенную среду, в которой хорошо себя чувствуют микоризообразующие грибы, обеспечивающие деревья питательными веществами. Затем, когда лес сформировался, дубы становятся в нем доминирующими деревьями и начинают препятствовать поселению здесь других деревьев. Как явственно следует из нашего исследования, эволюция дубов формировала сложные экологические взаимодействия в лесных сообществах. Этот факт помогает объяснить большое разнообразие и многочисленность деревьев в лесах Северной Америки. Дерево жизни дубов отбрасывает свою густую тень на структуру американских дубрав и других лесов.

Креативная гибридизация

Когда мы выяснили, какую ветвистую крону имеет эволюционное дерево дубов, нас заинтересовала высокая склонность этих деревьев к гибридизации. К гибридизации нередко относятся как к деструктивному процессу, стирающему генетические различия между видами. Но дубы часто образуют так называемые сингамеоны — группы видов, в которых, несмотря на продолжающийся обмен генами, сохраняются экологически и физически обособленные виды. Уже давно была выдвинута гипотеза, что миграция генов между видами сингамеона помогает дубам приспособляться к новым средам. В этой связи, например, возникает вопрос: могли ли гены звездчатого дуба, ответственные за его устойчивость к засухе, передаваться крупноплодному дубу (*Quercus macrocarpa*) в южных регионах, где вместе произрастают эти деревья, и помочь данному виду лучше приспособиться к засушливым условиям, с которыми он, похоже, вскоре столкнется в результате глобального потепления. Как уже известно, между видами дуба имеет место локальный перенос генов и представители этих видов различаются обменяемыми наборами генов в зависимости от характера окружающего их ландшафта, соседствующих с ними деревьев, климата и других условий их местообитаний. Мы знаем также, что после миграции генов от одного вида к другому они могут переместиться за пределы ареала вида, у которого они первоначально присутствовали. Такие примеры наводят на мысль, что адаптивный поток генов может играть важную роль в эволюции дубов. Сегодня мы лишь приступаем к комплексным геномным и экологическим исследованиям, необходимым для более глубокого понимания этого процесса.

Нам еще предстоит выяснить, какие гены и факторы (сроки цветения, предпочтения относительно среды обитания, географические расстояния и т.д.) регулируют процесс видообразования у дубов и развиваются ли у деревьев экологические различия, когда их популяции растут бок о бок, а не изолированно. Мы уже близки к пониманию того, какие гены ответственны за дифференциацию видов. Как показали недавние исследования европейских дубов, в этом процессе участвуют гены, влияющие как на их способность к перекрестному опылению, так и на экологические предпочтения (например, устойчивость к засухе, холоду и болезням). Но эти факты свидетельствуют лишь о том, что у видов развиваются экологические, а не геномные различия.

Выяснив, когда, где и каким образом дубы обрели свое разнообразие, мы поймем, как эти деревья будут противостоять грядущим изменениям окружающей среды и насколько быстро они смогут к ним адаптироваться. Когда примерно 20 тыс. лет назад началось отступление ледников, дубы быстро мигрировали на север и ключевым фактором такой стремительности стала, похоже, их межвидовая гибридизация. Понимание адаптивных преимуществ, которые дает деревьям перенос генов, имеет критическое значение для прогнозирования их устойчивости к новым для них грибным болезням и вредителям, с которыми им, возможно, придется столкнуться в результате климатических изменений. Поскольку насекомые, переносящие патогенные грибы, в последнее время быстро расширяют свои ареалы и меняют сроки размножения, существованию дубов угрожает серьезная опасность — если, конечно, они не научатся достаточно быстро и эффективно противостоять заболеваниям, с которыми никогда не сталкивались прежде. Наша задача на ближайшее десятилетие — обстоятельно выяснить, какое влияние окажут дифференциация видов и перенос генов между ними на траекторию эволюции дубов и устойчивость их популяций. Только достаточно полно изучив эти процессы, мы получим шанс предсказать, как будут выглядеть леса нашей планеты через 100 и более лет. ■

Перевод: А.В. Щеглов

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Гаджил М. Священные рощи // ВМН, № 1–2, 2020.
- Leaf-Level Trade-offs between Drought Avoidance and Desiccation Recovery Drive Elevation Stratification in Arid Oaks. Beth Fallon and Jeannine Cavender-Bares in *Ecosphere*, Vol. 9, No. 3; March 2018.
- Oaks: An Evolutionary Success Story. Antoine Kremer and Andrew L. Hipp in *New Phytologist*, Vol. 226, No. 4, pages 987–1011; May 2020.

ВИРУСЫ: В ПРЕКРАСНОМ И ЯРОСТНОМ МИРЕ



Наши сегодняшние собеседники — **Петр Михайлович** и **Константин Михайлович Чумаковы**, представители династии, которая уже много десятилетий занимается вопросами фундаментальной и прикладной биологии и медицины. Их отец, академик Михаил Петрович Чумаков, — выдающийся советский вирусолог, основатель и первый директор Института полиомиелита и вирусных энцефалитов. Среди его заслуг — открытие и изучение вируса клещевого энцефалита, организация клинических испытаний и внедрения первой вакцины против полиомиелита. Мать, член-корреспондент Академии медицинских наук СССР Марина Константиновна Ворошилова, тоже посвятила свою научную жизнь вирусологии, создала концепцию полезных вирусов человека, на основании которой был предложен метод неспецифической защиты и лечения вирусных и невирусных заболеваний. Неудивительно, что братья Чумаковы — тоже вирусологи и каждый из них имеет собственные уникальные разработки в этой области.

«ВИРУСЫ — НАШИ ДРУЗЬЯ, А НЕ ВРАГИ»

Петр Михайлович Чумаков,
*член-корреспондент РАН, главный научный
сотрудник Института молекулярной
биологии им. В.А. Энгельгардта РАН,
заведующий лабораторией пролиферации
клеток:*

— Петр Михайлович, ваш выбор вирусологии как дела жизни, наверное, был предопределен?

— В значительной степени да. За два года до окончания школы мы вместе с братом Константином начали стажироваться в Институте полиомиелита и вирусных энцефалитов и заниматься лабораторной вирусологической работой. У нас уже была какая-то квалификация, мы вошли в эту область, которая оказалась очень интересной, и хотелось в этом направлении продолжать. Другое дело, что продолжать можно было двумя путями: идти в медицину или в биологию. Константин решил, что будет заниматься биологией. А я пошел в медицину. Меня это привлекало больше, потому что проблемы, которые мы решаем, касаются человека. Конечная цель — сделать нечто, что принесет пользу или даст практический выход, который можно использовать для восстановления здоровья и спасения жизни.

— Оставаясь вирусологом, вы занялись проблемами онкологии. Каким образом вы вышли на эту взаимосвязь?

— Во многом благодаря маме. Хотя и не только. Еще в школьные, а потом в студенческие годы, в медицинском институте, я фактически работал в области вирусологии в Институте полиомиелита под руководством члена-корреспондента академии наук В.И. Агола. Он и сейчас жив-здоров, ему 90 лет, это выдающийся наш ученый-вирусолог. Но потом встал вопрос об аспирантуре, и мне захотелось переключиться на что-то новое. Я пришел в институт молекулярной биологии в лабораторию будущего академика Г.П. Георгиева. Это было очень интересное время, когда начиналась геновая инженерия. Структуру и функции генов тогда



начали изучать на вирусах, потому что это самая простая модель. И поэтому Г.П. Георгиев решил открыть у себя лабораторию вирусологии, которая будет отвечать современным требованиям. Когда я туда пришел, передо мной была поставлена задача создать вирусную модель на основе обезьяньего вируса SV-40. Это вирус ДНК, который в то время был горячей моделью для изучения генов. Он также может вызывать опухолевую трансформацию клеток грызунов, что важно для понимания механизмов опухоли. И вот через этот мостик я перешел к проблемам опухолевого роста.

После окончания аспирантуры и защиты кандидатской диссертации я решил продолжить работу в этом направлении. Меня интересовал вопрос: а каким же образом происходит злокачественная трансформация под действием вируса? Как раз в это время, в 1979 г., в журнале *Nature* появилась работа, которая показывала, что продукт вирусного гена, большой T-антиген, белок, который необходим и достаточен для опухолевой трансформации клеток, связывается с неким клеточным белком. Сразу возникла мысль: так, может быть, это и есть та самая универсальная кнопка, на которую вирусный белок нажимает — и клетка превращается в опухолевую?

— И, соответственно, если эту кнопку заблокировать, то можно избежать канцерогенеза?

— В то время было представление, что это взаимодействие можно каким-то образом заблокировать. Потом оказалось, что это не так, и это тем более интересно. Я взялся тогда клонировать тот самый ген *p53*, который сейчас считается центральным опухолевым супрессором. Это ген, поломка которого неминуемо ведет к образованию опухолевой клетки. В 1982 г. мне удалось клонировать ген *p53*, то есть выделить его в виде плазмиды. Это открыло возможности для его изучения. В это время шла очень большая международная гонка клонирования гена *p53*, всем было понятно, что это интересная, заманчивая, интригующая мишень. Моя работа открыла дорогу на международный уровень, меня стали приглашать в разные страны. Я проработал два года в Англии, куда был приглашен сразу в качестве старшего научного сотрудника, а потом, спустя годы, занимался этим объектом и в Соединенных Штатах, в Кливленде. В течение 15 лет я совмещал работу здесь и там. До 12 раз в год летал через океан. Там мы делали более продвинутую работу, потому что там очень хорошее снабжение и можно получить все, что заказал, буквально на следующий день. Такая работа доставляла огромное удовольствие.

— Тем не менее вы отказались от этих поездок и остались здесь. Почему?

— Потому что здесь тоже началась какое-то возрождение, была объявлена программа мегагрантов, приглашающая ведущих ученых из-за рубежа для инициации крупных проектов. Для этого надо было организовать новую лабораторию по новой теме в другом регионе, где ты никогда не работал. Я вспомнил про те проблемы, с которых начинал, будучи еще студентом: онколитические вирусы, обладающие терапевтическими свойствами.

Эти работы начинались в Институте полиомиелита под руководством моей матери М.К. Ворошиловой. Штаммы, которые мы сейчас используем для терапии рака, были впервые получены во время полиомиелитной кампании. Это непатогенные энтеровирусы, которые впервые были замечены во время вакцинации, когда у некоторых детей не образовывались антитела к полиовирусу. Было установлено, что у них в кишечнике идет бессимптомная инфекция. Тогда были выделены непатогенные энтеровирусы, которые потом использовались для неспецифической профилактики многих вирусных инфекций, а также были замечены их онколитические свойства, которые начали изучать. Но работы эти были свернуты.

— Почему?

— Тогда они оказались преждевременными. Однако свою роль они сыграли. М.К. Ворошилова привнесла в медицинскую науку нечто такое, что сейчас особенно востребовано: она заявила, что разные вирусы обладают разной специфичностью в отношении разных раковых клеток. Один и тот

же препарат может оказаться неэффективным для одних больных и эффективным для других. Это создало предпосылки к нынешнему панельному подходу к применению онколитических вирусов — тому, чем мы сейчас занимаемся. Наша работа — фактически продолжение того, что начала мама. Ее вклад, позволяющий понять индивидуальную природу онколитических вирусов, только сейчас может быть оценен. Мы знаем, что под каждого больного надо подбирать свой препарат. Сейчас это называется «персоналицированная медицина», и это особенно актуально для биотерапии.

— Знаю, что вы научились лечить раковые заболевания с помощью вирусов. И это невероятно популярно. Почему?

— Это популярно потому, что сейчас в онкологии наблюдается тупик. Рак может быть полностью излечен на ранних стадиях, когда хирургический нож позволяет удалить все раковые клетки. Если же происходит распространение рака в виде метастазов, то это уже практически неизлечимое заболевание. Тогда основная задача — как можно дольше продержать больного в ремиссии. Но все равно полностью излечить рак, когда он получил распространение, уже невозможно. И для этого есть несколько фундаментальных причин, которые кроются в природе раковой клетки.

Раковая клетка — это не часть организма, а самостоятельный одноклеточный организм, который эволюционирует внутри организма по своим правилам. Эволюционируя, он может ускользнуть от любого воздействия. Какую бы химию на него ни налили, уничтожить его полностью нельзя: там имеется, предположим, несколько миллиардов раковых клеток, и пусть даже миллионы погибнут, но все равно останется какое-то количество, что потом даст рецидив. Любые химиотерапия, таргетная терапия, радиотерапия всегда приводят к рецидиву. Конечно, бывают случаи, когда мы видим длительную ремиссию



М.К. Ворошилова и М.П. Чумаков, 1968 г.

и человеку кажется, что он, как говорят американцы, *cancer-free*. Но это все же не так.

Значит, надо искать какие-то другие способы борьбы. И вот как раз вирусы открывают возможность для того, чтоб излечить человека полностью, даже если у него распространенная форма рака. Дело в том, что раковая клетка может присутствовать в разных формах — в том числе в виде раковой стволовой клетки. Эта небольшая популяция клеток особо устойчива к любому воздействию. Вирусы способны уничтожать даже раковые стволовые клетки. И поэтому можно, воздействуя на пациента, вызвать полное уничтожение раковых клеток в организме. Но это пока только теоретически, потому что остается еще множество проблем, которые надо решать. Именно над этим мы сейчас и работаем. Хотя наряду с проведением этой работы мы не можем удержаться от того, чтобы все-таки попробовать. Мы даем нашим пациентам препарат.

— **Что представляет собой ваш препарат?**

— Это вирусные частицы, которые находятся в очищенном виде в определенном растворе. Их хранят в заморозке. Пациенту их вводят внутривенно, напрямую или с помощью клеточных носителей. Мы разработали технологию, когда у пациента можно взять несколько миллилитров крови, приготовить препарат дендритных клеток и потом *in vitro*, то есть в пробирке, зарядить их вирусом, после чего эти зараженные дендритные клетки можно ввести пациенту. Такие клетки направлены идут в сторону опухоли, где выгружают этот вирус и заражают раковые клетки.

— **Ваши препараты воздействуют только на раковые клетки или на весь организм?**

— В значительной степени — на раковые клетки. Надо понимать, что в природе существует очень много непатогенных вирусов, и мы используем именно такие. Раньше считалось, что вирусы — возбудители болезни, наши враги. Но это не так. Сейчас выясняется, что меньшая часть вирусов вызывает болезнь, а есть огромное число вирусов, которые могут паразитировать бессимптомно. Вообще задача и стратегия вируса — не убить и даже не вызвать заболевание, а быть как можно более незаметным. Таким образом они обеспечивают свое распространение. Обычно болезнетворные вирусы — это те, которые перешли от какого-то другого вида животного, например от птиц или летучих мышей. А человеческие вирусы в большинстве своем не патогенны.

— **Почему же эта область исследований до сих пор не нашла широкого применения?**

— Дело вот в чем. На протяжении последних 30 лет многие лаборатории и компании мира разрабатывают каждая свой вирусный препарат, вводят в вирус какие-то модификации, делают его более эффективным, патентуют, а потом дело доходит



Академик М.П. Чумаков, 1963 г.

до клинических испытаний. И тут выясняется, что положительный ответ у больных наступает, предположим, в 20% случаев, а в других — никакого эффекта не обнаруживается. То есть так можно вылечить только небольшую часть пациентов. Происходит это потому, что раковые опухоли очень индивидуальны, как и раковые клетки. Если у одного пациента клетки опухоли чувствительны к использованному вирусу, то у другого они могут быть нечувствительны. Эволюция раковой клетки обеспечивает ей более быстрый рост, но при этом какие-то функции, которые не нужны в обычной ситуации, могут утрачиваться. Например, клетка может лишиться способности заразиться определенным вирусом. Это означает, что под опухоль каждого больного нужно подбирать активный вирус.

— **Для этого требуется молекулярно-генетический анализ опухоли?**

— Мы над этим работаем. Но пока мы опираемся на известные данные, потому что современная вирусология — очень продвинутая наука. Нам известны свойства многих вирусов, их жизненный цикл. Вначале мы подбираем теоретически, потом проверяем экспериментально. Для этого берем много разных типов раковых клеток, заражаем несколькими разными вирусами последовательно и смотрим, какой спектр пациентов данный конкретный вирус заражает. Устанавливаем закономерности, а имея в руках живые опухолевые клетки пациента, можем подобрать под них вирус.

— **Какие результаты показывают ваши препараты?**

— О результатах говорить рано. Мы пока не располагаем клинической базой и сейчас находимся на пути к получению официальных разрешений. Мы уже разработали технологию очистки вирусного препарата, после чего должны провести доклинические исследования на животных. Они должны осуществляться не у нас, а в сертифицированной лаборатории. Сейчас у нас есть соглашение с НИИ гриппа им. А.А. Смородинцева в Санкт-Петербурге, который будет проводить такие испытания в 2021 г. После этого надо будет получить соответствующее финансирование, чтобы приступить к клиническим испытаниям, а это довольно дорогое дело. У нас уже есть договоренность с крупными федеральными научно-клиническими центрами, которые за это возьмутся. Все они заинтересованы в проведении таких клинических испытаний. Но это не произойдет очень быстро. Хотя, как я уже сказал, у нас есть препарат, в безопасности которого мы уверены. И мы даем его тем больным, которые находятся в терминальной стадии заболевания.

— Вы следите за их дальнейшей судьбой? Происходит ли какое-то чудо?

— Конечно, следим. Не знаю, можно ли назвать чудом, когда к нам приходит больная с большим асцитом, которой говорят, что жить осталось не больше месяца. Когда откачиваешь асцит, возникает дефицит белка, такие больные долго не живут. А тут она живет четыре года и нет никаких симптомов заболевания. Есть также случаи с глиобластомой. Это абсолютно смертельное заболевание, но у нас есть несколько примеров, когда опухоль начинает медленно регрессировать. Причем эта скорость очень разная у разных больных, а на некоторых вирус может вообще не подействовать, потому что обычно мы не имеем возможности протестировать опухоль пациента до начала лечения. Поэтому наша стратегия — последовательно давать препараты

разных вирусов в надежде на то, что в конечном счете найдется тот, который подействует.

Кроме того, существует большая проблема доставки вируса в опухоль. Вместо того чтобы вводить препарат внутривенно, мы предлагаем использовать клеточные носители, то есть собственные иммунные клетки из крови пациента, получить определенные субфракции этих клеток и с их помощью вводить вирус в организм. Но, опять же, нет гарантии, что это пройдет эффективно, особенно у терминальных больных с огромной опухолевой массой. Так что вопросов пока остается очень много.

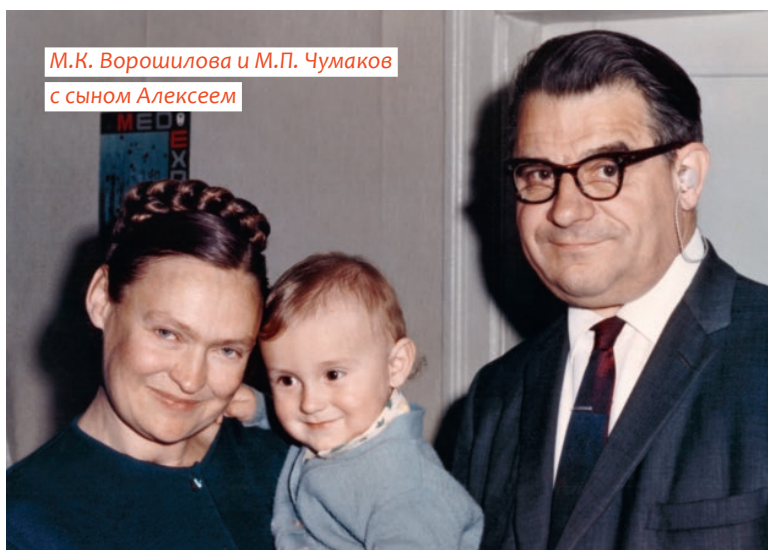
— Благодаря каким механизмам вирус уничтожает раковые клетки?

— Вирус — это только затравка, начало лечения, а основное терапевтическое действие довершает иммунная система пациента. Дело в том, что опухолевые клетки защищают себя от действия иммунной системы. Например, они начинают секретировать такие факторы, которые, взаимодействуя с клетками иммунной системы, выключают их активность. В результате опухоль может привлечь множество иммунных клеток, призванных уничтожить раковые клетки, но они оказываются неактивными. Более того, какие-то из этих клеток, наоборот, начинают выполнять роль защитника, например секретировать факторы, которые способствуют прорастанию сосудов, улучшая питание опухолевых клеток. То есть в опухоли формируется иммуносупрессивное микроокружение.

Когда в опухоль проникает вирус, он так изменяет это микроокружение, что оно перестает быть иммуносупрессивным, а становится, наоборот, иммуноактивным. Антигены раковых клеток становятся лучше видимы иммунной системой, а раковые клетки подвергаются иммунной атаке.

— Почему вирусам удается это сделать?

— В нормальной клетке есть такие механизмы борьбы с вирусами, которые обеспечивают сохранность организма, а не самой клетки. Когда клетка впервые сталкивается с вирусом, она начинает сигнализировать всем остальным клеткам, что произошло внедрение вируса. Зараженная клетка принимается секретировать важный цитокин интерферон, выделять целый коктейль других факторов, которые действуют на окружающие клетки и защищают их от вирусной инфекции. Опухолевая клетка более чувствительна к вирусам, потому что она утрачивает способность сигнализировать об опасности и вырабатывать невосприимчивость к вирусам под воздействием интерферона. Она оказывается безоружной против вирусной инфекции. Когда вирус попадает в опухоль, туда устремляются



М.К. Ворошилова и М.П. Чумаков
с сыном Алексеем

иммунные клетки, чтобы с ним бороться, но встречаются другого врага — раковые клетки, которые тут же начинают истреблять. А сами раковые клетки под воздействием интерферона утрачивают способность выключать активность иммунных клеток, и в результате в опухолевом микроокружении формируется иммуноактивное состояние. Даже когда вирус уже ушел из организма, иммунный процесс остается запущенным и опухоль продолжает деградировать.

Этим эффект вируса принципиально отличается от действия, предположим, химиотерапии или какого-нибудь таргетного препарата. Они с постоянством действуют на одно из отличительных свойств раковой клетки, и клетка получает возможность измениться и извернуться. Но если вы действуете на клетку сразу с нескольких сторон, да еще и с помощью природных механизмов, которые высокоспецифичны, то действие оказывается очень эффективным.

— Иначе говоря, речь идет о принципиально новом способе лечения рака?

— Да, это радикально новый способ лечения рака, который активно развивается во всем мире. И, хотя у нас здесь особого приоритета нет, мы имеем высокий шанс занять ведущие позиции и довести этот метод до широкого использования в клинике. Ведь в отличие от многих мы применяем панели вирусов, из которых можно подобрать препарат под каждого пациента, такого пока никто больше не делает. Наша панель постоянно пополняется новыми штаммами, и я надеюсь, что если нам удастся ускоренными темпами провести клинические испытания, то мы сможем добиться успеха.

— Вы сказали, что под руководством вашей мамы были выделены энтеровирусы, которые также можно использовать для профилактики многих вирусных заболеваний. Как тут быть с коронавирусом?

— Да, их можно использовать и в профилактических целях. Это еще одно значимое направление, которое в свое время развивалось в Институте полиомиелита, и Марина Константиновна здесь тоже сделала много важного и актуального. Когда были выделены эти энтеровирусы, оказалось, что они не вызывают никаких симптомов, но если их, например, дать проглотить здоровому человеку, то в течение двух-трех недель он будет защищен от любой вирусной инфекции. Это явление носит название интерференции вирусов, потому что в ответ на эту бессимптомную инфекцию в организме вырабатывается интерферон, который защищает от любого вируса. Безусловно, этот метод может быть эффективным средством борьбы с новой коронавирусной инфекцией. Конечно, нам этого в массовом масштабе никто не разрешит, хотя сам я таким образом защищаюсь от вирусов всю жизнь — в том числе от гриппа. А для выхода

на практическое здравоохранение нужно большое исследование. Кстати, такие испытания проводились с 1968 по 1971 г. на контингенте из 320 тыс. человек во время эпидемии гриппа в пяти городах Советского Союза — Таллине, Киеве, Ленинграде, Москве и Горьком. Они показали очень высокую эффективность: в три с половиной раза снизилась заболеваемость среди тех, кто получил эту вакцину. Это лучше, чем при применении противогриппозной вакцины.

— Петр Михайлович, у вас в лаборатории много молодежи. Где вы берете молодых ученых?

— У нас много замечательной, талантливой молодежи, но, к сожалению, моя лаборатория на протяжении всех лет ее существования работает почти исключительно на экспорт. Как только человек получает высокую квалификацию, он стремится уехать работать за рубеж. Так было после развала СССР и продолжается сейчас. Биомедицинские специалисты очень востребованы и высоко ценятся на Западе.

— Почему так происходит?

— Тому много причин. Одна из них — у нас нет обратной связи. Мы не можем сказать начальству, что не так, потому что нас не слушают. Представители министерств не интересуются такими проблемами, а меры, которые они принимают, только усугубляют ситуацию. При этом денег на науку выделяется все больше, но тратятся они все менее эффективно. Все, что мы делаем, — это пока, к сожалению, вопреки, а не благодаря.

— Не жалеете, что уехали из Кливленда? Там, наверно, спокойнее бы работалось?

— Не жалею. Я считаю, что жить надо в своей стране. Уехать — это значит не уважать себя, свое прошлое, свою семью. Что вообще у человека должно быть главным? Его личная жизнь или понимание того, что он часть династии, часть своей страны? Я в шестом поколении практический медик, мои дети тоже врачи, надеюсь, что и внук станет врачом. Для меня очень важно, чтобы дети, внуки знали свои корни, уважали свое прошлое, знали свою историю. Ради чего уезжать? Чтобы дети говорили с акцентом, забыли нашу великую культуру? Я считаю, что это просто абсурд. Многие крупные задачи нельзя решить силами одного поколения, нужна династическая преемственность.

— То есть вы готовы пожертвовать личным благополучием ради этих высоких целей?

— Вы знаете, я как-то всегда умудрялся неплохо жить. У нас есть семейная ферма в Калужской области, там теперь почти безвылазно трудится жена, я бываю на выходных, помогаю, чем могу. Жить можно, и совсем не плохо, интересно. Можно, конечно, ныть и жаловаться — этого не дали, того не дали... А ты возьми и сделай, в конце концов. И жизнь постепенно наладится. Голова есть, руки есть. Очень многое в наших силах. Верю в это.

«ЖИВАЯ ПОЛИОМИЕЛИТНАЯ ВАКЦИНА ПОМОЖЕТ В БОРЬБЕ С COVID-19»

Константин Михайлович Чумаков,
вирусолог, работающий в области вакцин,
доктор биологических наук, профессор,
директор Центра передового опыта Глобальной
вирусологической сети, советник ВОЗ:

— Константин Михайлович, вы представитель династии Чумаковых, которые уже не первый десяток лет трудятся в области вирусологии. Но все они жили и работали в России. Почему вы уехали в Америку? Почему не остались продолжать дело родителей в своем отечестве?

— Я уехал в США в 1989 г., потому что возможности работать в России практически не было. Я окончил кафедру вирусологии биофака МГУ и лет десять работал в Московском университете. Защитил в 1987 г. докторскую диссертацию, после чего меня пригласили в Институт микробиологии Академии наук заведовать лабораторией генетики. Я совершил ошибку, приняв это предложение, потому что в реальности оказалось, что в этом институте ничего не было. В течение двух лет я и мои сотрудники (а я пригласил своих лучших учеников из университета) сидели в пустых стенах, без оборудования, даже без мебели. Когда я получил предложение поехать в Америку, то с радостью его принял и никогда об этом не жалел.

— Что за эти годы удалось сделать в США?

— Я молекулярный биолог, вирусолог. И меня пригласили специально для того, чтобы я помог разработать тест для контроля вакцины против полиомиелита. Надо сказать, живя в Советском Союзе, я никогда не занимался вакцинами и вообще вел чисто фундаментальную работу. Такая была у нас школа. Считалось, что фундаментальная наука — это что-то высокое, а практическая наука — нечто более низменное. Приехав в Америку, я понял всю неправильность этого разделения и последние 30 с лишним лет занимаюсь вещами



вполне прагматическими. Мы разрабатываем методы создания вакцин, которые были бы и безопасны, и эффективны, то есть занимаемся практическими аспектами вирусологии.

— Вы работаете над полиомиелитными вакцинами, и это же было делом многих лет жизни вашего знаменитого отца. Это случайность или закономерность?

— Это скорее случайность. Я вообще не собирался становиться биологом. И на биофак МГУ попал случайно. Мой брат Петр собирался туда поступать, и по дороге на дачу мы с ним заехали в университет, чтобы он подал документы. Так вышло, что у меня тоже были с собой документы, вот я и подумал: а почему бы и нет? В конце концов, я ничего не теряю. Я подал и поступил.

— Не пожалели впоследствии?

— Нет, не пожалел. Мне нравилась обстановка на биофаке. Это был конец 1960-х гг., очень веселое время, все были молодые и радостные. Постепенно я втянулся, особенно заинтересовала своей четкостью вирусология. Мы занимались молекулярными исследованиями, а это практически химия — органическая и биоорганическая. Это давало простор для творчества, когда можно было одному человеку сделать что-то новое. У меня уже тогда появились статьи, опубликованные без соавторов. Сейчас вы не найдете областей науки, где люди могут опубликовать какую-то осмысленную статью без соавторов, а тогда это было возможно, и это вполне соответствует моему индивидуалистическому характеру.

— **Константин Михайлович, еще в начале пандемии вы говорили, что полиомиелитными вакцинами можно в значительной степени решить проблему новой коронавирусной инфекции. Вы по-прежнему так считаете или ваше мнение изменилось?**

— Конечно можно, было бы желание. Тут вся проблема в том, что это слишком простое решение. Большинство ученых не хотят конкуренции. Сейчас все стараются создать специфические вакцины, государство выделяет на это миллиарды долларов. А полиомиелитная вакцина стоит 15 центов за дозу. Поэтому никому это не интересно.

— **А если мы отодвинем в сторону материальную составляющую и поговорим с чисто медицинской точки зрения — как можно объяснить эффективность такой вакцины в случае коронавируса?**

— С медицинской точки зрения абсолютно очевидно, что это не может не работать. Во-первых, вирус SARS-CoV-2, как, впрочем, и многие другие вирусы, очень боится врожденного иммунитета. В нем содержится несколько генов, которые нарушают механизмы врожденного иммунитета, сигнализирование, которое ведет к образованию интерферона. Если бы вирусу были не страшны интерферон и врожденный иммунитет, он не стал бы растрачивать свой драгоценный генетический материал, чтобы с этим бороться.

Второе. Генетический анализ людей, которые переболели коронавирусом, показывает, что тяжесть болезни коррелирует именно с функционированием системы врожденного иммунитета. В частности, люди, у которых имеются дефекты сенсора, детектирующего присутствие РНК-вирусов, болеют гораздо тяжелее.

Третье доказательство связано с тем, что опыты по применению интерферона на ранних стадиях инфекции значительно облегчают течение болезни. Вообще, интерферон потому так и называется, что он интерферирует с размножением практически всех вирусов.

Еще известно, что SARS-CoV-2 не очень хорошо индуцирует интерферон за счет генов, которые блокируют сигнализирование, ведущее к индукции интерферона. Все эти данные говорят о том, что, скорее всего, индукция механизмов врожденного иммунитета должна этому вирусу препятствовать.

Но, к сожалению, практически никто из тех, кто работает в области создания вакцин, не учитывает врожденный иммунитет как фактор в механизме их действия. Все заботятся только об индукции нейтрализующих антител. Некоторые думают еще об индукции Т-клеточного иммунитета, но врожденный иммунитет, который лежит в основе всего, остается за скобками. Это совершенно неправильно. Поэтому мне кажется, что использование неспецифической защиты, которая индуцируется

живыми вакцинами, — это совершенно новый, перспективный подход к пониманию того, как вакцина действует.

— **Означает ли это, что нынешние специфические вакцины от новой коронавирусной инфекции могут быть неэффективными?**

— Трудно сказать. Их сейчас создается больше 200 штук, и они основаны на очень разных принципах — начиная от синтетических вакцин и заканчивая живыми аттенуированными вакцинами. Какие-то из них, наверное, могут быть эффективны. Пока остается открытым вопрос, возникает ли устойчивый иммунитет против этой болезни. Есть сообщения, что люди могут быть инфицированы по второму разу. Пока трудно сказать что-то определенное — слишком мало прошло времени. Однако ясно, что против такого продвинутого патогена нужно задействовать все ветви иммунного ответа. Если стратегия вашей вакцины основана только на индукции антительного гуморального ответа, то, скорее всего, это не будет эффективно надолго. Нейтрализующие антитела, безусловно, могут защитить вас от болезни, но проблема в том, что, как любые антитела, они довольно быстро распадаются. Период полураспада антител составляет около трех недель, поэтому для поддержания их уровня необходимо, чтобы возникли клетки памяти, которые выделяли бы некоторый фоновый, базовый уровень антител. При повторной инфекции они быстро размножились бы и выдавали значительное количество защитных антител. Вполне возможно, что против коронавируса не возникает таких клеток памяти, подобно тому как не образуются клетки памяти в случае вируса иммунодефицита человека, и это основная причина, почему у нас пока нет вакцин против ВИЧ. Сходство структуры белка gp-120 и шипового белка коронавирусов наводит некоторых ученых на мысль, что иммунитет против коронавируса будет недолговечным. Думаю, что клинические испытания покажут



М.К. Ворошилова демонстрирует методы на курсах ВОЗ



Слева: М.К. Ворошилова, 1962 г.

Справа: М.К. Ворошилова, 1980 г.

эффективность вакцины на протяжении трех-четырех месяцев, но что произойдет через год, нам неизвестно.

— А живые неспецифические вакцины могут дать лучший результат?

— Т-клеточная память более надежна. Конечно, хорошо бы создать вакцину, которая будет индуцировать стерилизующий иммунитет, то есть делать человека полностью невосприимчивым к заражению этим вирусом. Но неизвестно, получится ли это. Стерилизующие вакцины должны быть основаны на индукции хорошего антительного ответа. Но это вторая линия защиты. А первая линия — это врожденный иммунитет. Если вирус прорвался через врожденный иммунитет и начал размножаться, то здесь могут помогать антитела, которые индуцированы вакциной. Но если и это не сработало и часть клеток осталась зараженной, то в бой вступает тяжелая артиллерия — Т-клетки, которые уничтожают клетки организма, зараженные вирусом. Поэтому вполне может быть, что стерилизующий иммунитет создать не удастся. Однако если получится сделать болезнь более легкой и менее смертельной, то это уже хороший результат. Многие вакцины неспособны защитить человека от инфекции, но могут предохранить от заболевания.

— Константин Михайлович, сейчас нас слушают, почитают и скажут: не пойду я вакцинироваться от COVID-19, а пойду-ка сделаю себе прививку от полиомиелита — наверное, это будет лучше и безопаснее. Что вы скажете по этому поводу?

— Я бы тоже не пошел прививаться от COVID-19 до тех пор, пока не будут доказаны безопасность и эффективность такой вакцины. Мне кажется, нет смысла прививаться неизвестно чем, если нет уверенности, что это принесет вам пользу и не причинит вреда. А что касается вашего вопроса, то прививка от полиомиелита, кори, БЦЖ или любыми другими живыми вакцинами, наверное, будет иметь в данном случае сходный защитный эффект. К сожалению, он не будет длиться очень долго. Речь идет о нескольких месяцах. Потом нужна ревакцинация. Поэтому если удастся создать специфические вакцины, которые вызовут устойчивый пожизненный иммунитет, то это будет предпочтительно. Но в качестве первого эшелона защиты, первого барьера, который можно поставить на пути новой пандемии, это вполне годится. Причем прелесть подобного подхода состоит в том, что он годится не только от коронавируса, а от любого другого возбудителя, в том числе и гриппа. Такой подход очень ценен, поскольку мы всегда можем его использовать, как только возникает новая пандемия даже неизвестного нам вируса.

— Обычно людям, которые хотят сделать себе такого рода прививку, предлагают сдать анализ на антитела к этому возбудителю и, если они понижены, рекомендуют вакцинацию. Если же нет, то вакцинация им не нужна и даже вредна. Как быть в этом случае?

— Здесь антитела ни при чем. Ведь речь идет не о том, чтобы подстегнуть уровень антител, которые эта вакцина стимулирует, а о том, чтобы индуцировать образование интерферона и других

механизмов врожденного иммунитета вне зависимости от антител. Поэтому ничего тестировать не надо. Если бы завтра, предположим, было объявлено о намерении привить всю Москву, то, я вас уверяю, *COVID-19* через две недели закончился бы.

— **Серьезно?**

— Абсолютно. Конечно, пандемия не завершилась бы до конца, но вирусу некуда было бы деваться, потому что если население станет резистентными хотя бы на несколько недель, то вирус за это время сильно ослабнет и передача его резко снизится. А когда эффект этой вакцины ослабнет, можно сделать по второму разу. В принципе, это готовый подход. Мы предлагали осуществить такое в Соединенных Штатах. Посчитали, что для всей страны, а в США проживает 350 млн человек, речь идет о каких-то \$40 млн. Это почти бесплатно. Особенно с учетом того, что экономика потеряла триллионы и сейчас миллиарды идут на разработку вакцин, которые могут еще и не работать. А тут готовое решение. Но нас не захотели услышать.

— **Это очень печально.**

— Это жизнь. Общество состоит из людей, у каждого есть свои интересы — и, к сожалению, не всегда эти интересы сочетаются таким образом, что выигрывает общество. Я ничего не имею против того, чтобы ученые разрабатывали новые вакцины, это абсолютно необходимо делать. Эти подходы не альтернативны друг другу. Но и наш подход важен и нужен. Мне кажется, совершенно недопустимо его не использовать.

— **Зачем сейчас создавать новые полиомиелитные вакцины? Разве уже существующие плохи?**

— Новые вакцины, безусловно, нужны. Нынешняя живая полиомиелитная вакцина замечательная, но в достаточно редких случаях она может вызывать осложнения за счет того, что вирус

мутирует и становится более патогенным. Она вызывает осложнения примерно в одном случае на 3 млн доз. Это неплохой результат, но, если вы окажетесь одним из этих трех миллионов, вас это не утешит. Поэтому сейчас создается вакцина нового поколения на основе знания молекулярной биологии и механизмов патогенеза. Ожидается, что она будет гораздо стабильнее генетически, не будет мутировать к вирулентности, соответственно, будет более безопасной.

— **Как вы сами защищаетесь от коронавирусной инфекции? Вы сделали себе прививку от полиомиелита?**

— К сожалению, в США нет живой полиомиелитной вакцины, поэтому я просто сижу дома. Начиная с середины марта я работаю удаленно и выхожу на улицу просто погулять или сходить за продуктами в магазин. Конечно, иногда хочется куда-то поехать, но все границы закрыты, даже из штата в штат не всегда возможно проехать. Надеюсь, рано или поздно это кончится. Хотя жизнь, конечно, не вернется в прежнее русло. *COVID-19* разделит ее на «до» и «после».

— **Как вы думаете, что кардинально изменится в нашей жизни после пандемии?**

— У нас уже никто не жмет руки, а те страны, где было принято целоваться при каждой встрече, теперь тоже пересмотрят свои привычки. Я видел по телевизору репортаж, где политические деятели вместо того, чтобы жать руку друг другу, соприкасаются локтями. Наверное, возникнет такая новая традиция. Думаю, многие будут продолжать носить маски, особенно в помещениях. Впрочем, это происходило в Китае, Японии, Юго-Восточной Азии и раньше. Может быть, потому в этих странах и пандемия не была такой жестокой, что там люди привыкли соблюдать такого рода гигиенические правила.



М.К. Ворошилова и М.П. Чумаков, 1983 г.

А если по большому счету, то в мире изменится многое. Уже сейчас поступают сообщения, что ряд компаний и учреждений, которые раньше снимали офисы, вдруг поняли, что они могут так же эффективно работать, когда сотрудники находятся дома. В результате трафик станет не таким напряженным, люди будут больше «ездить» по интернету, чем по дорогам.

Сейчас сильно упала стоимость недвижимости в Нью-Йорке, потому что многие оттуда уехали. Цены и дальше будут падать. Люди, которые платили безумные деньги, чтобы жить на Манхэттене и ходить там на работу, теперь с радостью обнаружили, что могут уехать на природу и жить в пять раз дешевле. Бизнес будет делаться по-другому. Во многих случаях все будет происходить дистанционно. Я вот, например, уже привык общаться в Zoom-конференциях, и меня это вполне устраивает.

Конечно, не хватает человеческого общения «лицом к лицу». Вы вроде бы можете решить все вопросы, но потолкаться в перерыве за чашечкой кофе и обсудить какие-то вещи неформально возможности нет. А для научного обмена, мне кажется, это критично. До пандемии я часто ездил на научные конференции, и самое главное, что я оттуда увозил, что услышал или о чем договорился, происходило во время кофейного перерыва. Пока непонятно, чем это можно заменить, но как-то, наверное, приспособимся.

— Но ведь многие люди вынуждены ходить на работу каждый день, находиться в тесных офисах, общаться с другими людьми. Что бы вы посоветовали таким людям, как им можно уберечься?

— Надо быть аккуратными. Когда я работал в лаборатории, у меня возникли некие условные рефлексы: если я подержался за какую-то нестерильную поверхность, а потом хочу взять флакон с культурой, то я мгновенно протираю или прыскаю руки спиртом. Какое-то шестое чувство возникает: чувствуешь, что рука может быть инфицирована. Она как бы горит. Думаю, сейчас такое чувство развивается у многих людей. Когда я выхожу на улицу, у меня на поясе висит бутылочка с санитайзером. Обязательно надо использовать маски. Они не гарантируют стопроцентную защиту, тем не менее это лучше, чем ничего. Поэтому тем людям, которые вынуждены ходить на работу, надо об этом все время думать.

— Константин Михайлович, как вы полагаете, чего нам ждать дальше от этой пандемии, как она будет развиваться?

— Трудно сказать, ведь в разных регионах она развивается по-разному. Где-то она идет на спад, а где-то началась вторая и даже третья волна. Например, в Нью-Йорке была всего одна волна в начале марта, она пошла на спад к концу апреля,

в мае упала, и сейчас там довольно хорошие цифры. В это время во Флориде, в Калифорнии все было спокойно. А сейчас у них идет вторая волна. Там, где я живу, в штате Мэриленд, тоже было две волны. Сейчас ситуация стабилизируется. Что за этим последует, никто не знает. Некоторые предсказывают по аналогии с другими респираторными заболеваниями, что в осенне-зимний сезон будет еще одна волна, но никто не знает, так ли это. Весной все ожидали, что летом эпидемия притихнет, потому что будет жарко. Но именно с началом жары, особенно на юге, коронавирус разгорелся с особой силой. Зато в этом году в Южном полушарии, где сейчас заканчивается зима, не было гриппа. Думаю, частично из-за того, что люди соблюдают гигиену, а частично потому, что коронавирус интерферирует с размножением вируса гриппа.

— Так, может быть, и осенью гриппа не будет?

— Может быть. Вирусы — это ведь целый мир со своими законами и загадками. Есть сезонные вирусы, такие как энтеровирусы, которые появляются в основном летом. В теплое время года люди купаются в воде и заражаются. Именно этим некоторые ученые объясняют, почему летом нет гриппа: энтеровирусы конкурируют с ним. А есть такие вирусы, у которых сезонность раз в два года. Они как часы: строго в четные годы есть вспышка, а в нечетные — нет. Существуют и вирусы с сезонностью раз в три года. Как это объяснить? Конечно, ученые все могут обосновать теоретически, но доказать, быть уверенным, что это правильное объяснение, я, например, не могу. Поэтому прогнозировать что-то, особенно для нового вируса, о котором мы мало знаем, слишком опасно. Я не берусь.

— А что вы можете сказать о пресловутом коллективном иммунитете? Он формируется?

— Я думаю, да. Одна из причин, почему в Нью-Йорке сейчас спокойно, — именно такой процесс. Согласно исследованиям уровня антител к этому вирусу, чуть ли не 20% населения уже имеют иммунитет. Многие, просто заражаясь этим вирусом, никогда не испытывали никаких симптомов. Это первое. Второе: даже если у вас нет антител, это не означает, что вы на 100% к нему чувствительны. Существуют достаточно веские аргументы в пользу того, что сезонные коронавирусы, а их четыре основных типа, индуцируют T-клеточный иммунитет, имеющий довольно широкий спектр защиты. Соответственно, люди, которые переболели этими коронавирусами, могут быть менее чувствительны к SARS-CoV-2. Вполне вероятно, частично этим и объясняется то, что сейчас смертность значительно падает. Надеюсь, этот процесс будет продолжаться и ничего особенно страшного нам уже не грозит. ■

Беседовала Наталия Лескова



ЭКОЛОГИЯ

ЖИВОТНЫЕ

ЖИВОТНЫЕ ПОРОЗНЬ

Лангусты, птицы и некоторые приматы обычно используют социальное дистанцирование, чтобы предотвратить заболевание, тогда как люди испытывают трудности с такой стратегией

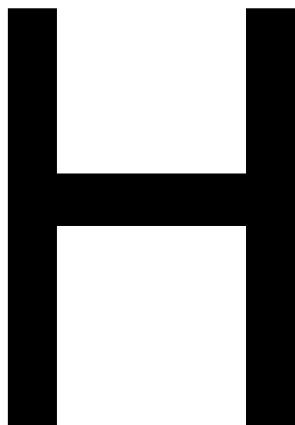
Джулия Бак и Дана Холи

ПОРОЗНЬ

ОБ АВТОРАХ

Джулия Бак (Julia C. Buck) — доцент Университета Северной Каролины в Уилмингтоне, где она руководит лабораторией экологии болезней.

Дана Холи (Dana M. Hawley) — профессор Виргинского политехнического института, изучает социальное поведение и болезни в среде животных.



а мелком рифе в группе островов Флорида-Кис молодой американский, или карибский колючий, лангуст (*Panulirus argus*) возвращается после ночного поиска вкусных моллюсков и забирается в узкую нору. Лангусты обычно делят друг с другом эти расщелины в скалах, и сегодня вечером приполз еще один. Однако с новичком что-то не так. Химические продукты в его моче пахнут по-другому. Эти вещества вырабатываются, когда лангуст инфицирован заразным вирусом *Panulirus argus virus 1*, и здоровые возвращающиеся с кормежки лангусты кажутся встревоженными. Как бы ни было трудно найти такую же нору, защищенную от хищников, молодые животные уходят в открытые воды подальше от смертельного вируса.

Реакция лангустов на болезнь, наблюдаемая как в полевых условиях, так и в лабораторных экспериментах, — то, что всем нам стало слишком хорошо знакомо в этом году: социальное дистанцирование. Людям пришлось прекратить близкие контакты с семьей и друзьями, чтобы сократить распространение *COVID-19*. Это крайне тяжело, и многие задаются вопросом о необходимости такого поведения. Социальное дистанцирование, каким бы неестественным оно нам ни казалось, — неотъемлемая сторона мира природы. Помимо лангустов, такие разные животные, как обезьяны, рыбы, насекомые и птицы обнаруживают больных представителей своего вида и дистанцируются от них.

Такой тип поведения распространен, поскольку помогает социальным животным выжить. Несмотря на то что существование в группах предоставляет животным возможность проще поймать добычу, не замерзнуть и избежать хищников, оно также приводит к вспышкам инфекционных заболеваний (спросите любого родителя, у которого ребенок ходит в детский сад). Подобный повышенный риск благоприятствовал эволюции форм поведения, которые помогают животным избежать инфекции. Животные, соблюдающие социальную дистанцию во время вспышек заболеваний, — те, кто с наибольшей вероятностью выживет. Это, в свою очередь, повышает их шансы произвести на свет потомство, которое тоже будет

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Несмотря на то что людям социальное дистанцирование может показаться неестественным, оно представляет собой часть мира природы и используется млекопитающими, рыбами, насекомыми и птицами.
- Социальные животные держатся порознь и меняют поведение, такое как груминг, чтобы остановить распространение болезней, способных их убить.
- Стратегии различны: от избегания больного животного до сохранения взаимодействия только с ближайшими родственниками.

использовать социальное дистанцирование при встрече с болезнью. Такие действия мы, специалисты по экологии болезней, называем поведенческим иммунитетом. У диких животных нет вакцин, но они могут предотвратить заболевание благодаря своим образу жизни и поведению.

Однако иммунитет за счет поведения тоже имеет свои издержки. Социальное дистанцирование от других представителей своего вида, даже временное, означает потерю целого ряда преимуществ, в первую очередь обеспечиваемых социальным образом жизни. Поэтому, как выяснили ученые, полное исключение контактов — это лишь один из способов, используемых животными. Некоторые социальные виды остаются вместе, когда члены группы инфицированы, но меняют, например, определенные взаимодействия во время ухода, тогда как другие, например муравьи, ограничивают контакты между особями, выполняющими определенную роль в колонии. Все это делается, чтобы снизить риск заражения.

Цена жертвы

Способность лангустов определять и избегать зараженных членов группы стала ключом к их выживанию при встрече с *Panulirus argus virus 1*, который убивает больше половины инфицированных молодых животных. Молодые лангусты — легкая добыча для вируса, поскольку это высокосоциальные животные, временами собирающиеся в норах в группы до 20 особей. Безопасные убежища среди губок, кораллов или в расщелинах скал океанского дна, а также масса щелкающих антенн помогают группам этих ракообразных защищаться от голодных хищников, таких как рыбы из семейства спиноголовых (*Balistidae*). Тем не менее в начале 2000-х гг. исследователь Дон Берингер (Don Behringer) из Флоридского университета с коллегами заметил, что некоторые молодые лангусты укрываются в норах поодиночке, даже если это делает их уязвимыми. Как обнаружили исследователи, большинство таких одиноких лангустов были заражены вирусом. Ученые заподозрили, что эти лангусты не выбирали одинокое логово: их избегали. Чтобы подтвердить свои догадки, исследователи поместили нескольких лангустов в аквариумы, позволяющие здоровым ракообразным выбрать пустую искусственную нору или одну из занятых здоровым или больным сородичем. В статье, опубликованной в 2006 г. в *Nature*, ученые сообщили, что в отсутствие болезни



Стратегическая дистанция: черные садовые муравьи (1) держатся в стороне от своей колонии, когда поражены грибом; мексиканские чечевицы (2) избегают других птиц, кажущихся большими

здоровые лангусты предпочитали социальный образ жизни и выбирали не пустые норы, а те, в которых обитали здоровые лангусты. При этом лангусты решительно избегали норы с инфицированными вирусом сородичами, даже если это означало, что им придется действовать в одиночку.

В ходе последующего исследования, результаты которого были опубликованы в 2013 г. в *Marine Ecology Progress Series*, Берингер и его коллега Джошуа Андерсон (Joshua Anderson) показали, что здоровые лангусты выявляли пораженных вирусом с помощью теста на запах. Оказалось, что в моче инфицированных лангустов присутствуют вещества, которые служат сигналом опасности для здоровых членов группы. Когда ученые с помощью суперклея



Относительный риск: мандрилы (1) занимаются обыскиванием близких родственников, даже если у тех есть паразиты, но избегают других пораженных членов группы; полосатые мангусты (2), крайне зависимые от групповой кооперации, чистят шерстку как больным, так и здоровым животным из своей группы

перекрыли у инфицированных мангустов органы, выделяющие мочу, здоровые животные перестали избегать больных.

Если мангусты выявят пораженных сородичей, они готовы пойти на значительный риск, чтобы не заболеть. Когда Марк Батлер (Mark Butler) из Университета Олд-Доминион с коллегами подсаживали больного мангуста в родную нору здоровых мангустов с островов Флорида-Кис, они видели, как здоровые животные часто бросали безопасные убежища и уходили в открытые воды, где риск быть съеденными намного больше. Когда команда Батлера повторила эксперимент, подсаживая здорового мангуста, массового исхода не наблюдалось. В своем исследовании, результаты которого были опубликованы в 2015 г. в *PLOS One*, ученые использовали математические модели, чтобы показать, что избегание больных особей, хотя и не без потерь, предотвращает вспышки вирусного заболевания, которое иначе уничтожило бы популяцию мангустов.

Защита ценных и уязвимых

Мангусты — далеко не единственные животные, обнаружившие, что преимущества социального дистанцирования иногда превосходят издержки. На самом деле некоторые животные разработали способы повышения выигрыша, используя социальное

дистанцирование стратегически, то есть таким образом, чтобы защитить наиболее ценных или уязвимых членов группы. Самые впечатляющие примеры встречаются у социальных насекомых, у которых разные члены колонии играют определенные роли, влияющие на выживание колонии.

В работе, проводившейся под руководством Натали Строймет (Nathalie Stroeymeyt) из Бристольского университета (результаты опубликованы в 2018 г. в журнале *Science*), исследователи воспользовались крошечными цифровыми метками, чтобы проследить за передвижениями колоний обычных черных садовых муравьев (*Lasius niger*) во время вспышки заболевания, вызываемого смертельным грибом *Metarhizium brunneum*. Споры этого гриба передаются от одного муравья к другому при физическом контакте; требуются один-два дня, чтобы споры гриба проникли в организм муравья и вызвали заболевание, часто летальное. Временной промежуток с момента воздействия гриба до проявления болезни дал Строймет с коллегами возможность наблюдать, меняется ли социальное поведение муравьев в течение 24 часов после обнаружения спор гриба в колонии, но до проявления признаков заболевания у пораженных грибом муравьев.

Для того чтобы оценить, как муравьи реагируют, когда возбудитель заболевания

2



только попадает в колонию, исследователи нанесли споры грибов прямо на подгруппу муравьев-фуражиров, которые регулярно покидают колонию. Фуражиры наиболее вероятно могут случайно встретиться со спорами грибов во время поисков пищи, поэтому такой подход имитирует естественный способ проникновения гриба в колонию. После этого поведение 11 колоний муравьев, обработанных грибом, сравнили с тем же числом контрольных колоний, в которых фуражиров помазали безвредным стерильным раствором. Муравьи в колониях с занесенным грибом начали быстро и стратегически использовать социальное дистанцирование после обработки. В течение 24 часов эти фуражиры самоизолировались, проводя больше времени вне колонии по сравнению с фуражирами в контрольных группах.

Здоровые муравьи в колониях с занесенным грибом также значительно сократили социальное взаимодействие, но способ зависел от выполняемой ими роли. Неинфицированные фуражиры, часто взаимодействующие с другими фуражирами, которые могут быть носителями возбудителя инфекции, держались от колонии на расстоянии, когда инфекция присутствовала. Такое поведение предотвращало возможность случайно подвергнуться риску ценных с точки зрения размножения членов колонии — матку и нянек, которые заботятся о расплоде. Няньки

тоже действовали: как только грибок был обнаружен в колонии, няньки переносили расплод глубже в гнездо, подальше от фуражиров. Сигналы, используемые муравьями для выявления и быстрого ответа на заражение грибом, по-прежнему неизвестны, но стратегическое социальное дистанцирование оказалось настолько эффективным, что все матки и большинство нянек в изучаемых колониях были живы по окончании экспериментально вызванных вспышек заболевания.

Садовые муравьи защищают самых ценных членов своей колонии, однако некоторые птицы используют другую стратегию, возможно, продиктованную силой их собственного иммунного ответа и сопротивляемостью инфекции. Максин Цильберберг (Maxine Zylberberg) с коллегами поместили мексиканских чечевиц (*Haemorrhous mexicanus*) в три прилегающие друг к другу клетки. В каждом случае с одной стороны от птицы в центральной клетке находилась здоровая чечевица, а с другой — птица, выглядевшая больной. (Этой особи делали инъекцию, вызывающую вялость.) Наблюдая за тем, сколько времени птица, находящаяся посередине, проводила с каждой стороны своей клетки, исследователи показали, что чечевицы в основном избегают птиц, выглядящих больными, но степень изоляции зависит от силы их собственной

иммунной системы. Птицы с более высоким уровнем антител в крови и еще одного белка, который подает сигнал к более обширной активации иммунной системы, демонстрировали меньшую антипатию. Однако птицы с более слабым иммунитетом активнее избегали больных птиц, сообщили исследователи в 2013 г. в *Biology Letters*.

Такая же закономерность была обнаружена у гуппи, пораженных червем *Gyrodactylus turnbulli* — заразным и вызывающим изнурительное заболевание паразитом. В ходе исследования, статья о котором была опубликована в 2019 г. в *Biology Letters*, Джессика Стивенсон (Jessika Stephenson) из Питтсбургского университета поместила отдельных гуппи, еще не зараженных паразитом, в центральный аквариум, по бокам от которого разместили еще два аквариума. Один

демонстрируют пример такого подхода. Эти животные живут группами от десяти до сотен особей в тропических дождевых лесах экваториальной Африки. Группы обычно состоят из расширенных семей, члены которых часто чистят друг друга; груминг выполняет гигиенические функции и способствует укреплению социальных связей. Однако, как отметили Клеманс Пуарот (Clémence Poirotte) с коллегами в отчете, опубликованном в 2017 г. в *Science Advances*, мандрилы определенным образом корректируют поведение, связанное с грумингом, чтобы избежать зараженных членов группы. Ученые наблюдали за ежедневными процедурами взаимного ухода мандрилов, свободно живущих в нацпарке в Габоне, и периодически собирали образцы фекалий, чтобы установить, какие животные тяжело поражены кишечными паразитами. Другие мандрилы активно уклоняются от груминга таких особей. Мандрилы способны определить наличие инфекции только по запаху: обезьяны, которым давали два натертых фекалиями бамбуковых стебля, решительно уклонялись от стебля, смазанного пометом другого мандрила, у которого было много паразитов.

И тем не менее иногда мандрилы отказываются от социального дистанцирования даже при встрече с инфекцией. В последующем исследовании, тоже под руководством Пуарот, выяснилось, что мандрилы продолжают обыскивать некоторых близких родственников, тяжело пораженных паразитами, даже когда дистанцируются от других зараженных членов группы. В опубликованной в 2020 г. статье в *Biology Letters* исследователи сообщают, что поддержание сильных безусловных связей с некоторыми родственниками в долгосрочной перспективе может обладать рядом преимуществ для нечеловекообразных приматов, так же как и для людей. У мандрилов самки, имеющие сильные социальные связи, приступают к размножению раньше и могут оставить больше потомков в течение жизни. Такое эволюционное преимущество, связанное с поддержанием некоторых социальных связей, возможно, стоит риска потенциального инфицирования.

Социальные связи некоторых живущих в группах животных могут быть настолько важны, что отказ от контакта никогда не выбирают, даже когда член группы явно болен. Например, исследование под руководством Бонни Фэрбенкс (Bonnie

Люди в отличие от животных обладают множеством преимуществ. Например, мы можем мгновенно оповестить весь мир об угрозе заболевания и ввести социальное дистанцирование еще до появления болезни в нашем локальном сообществе

аквариум был пуст, а во втором находилась группа из трех гуппи, представляющих потенциальный риск с точки зрения заражения. Многие гуппи предпочитали сторону аквариума рядом с другими гуппи, как и ожидалось для социального вида. Однако некоторые самцы решительно избегали стороны аквариума рядом с другой рыбой, и позднее выяснилось, что эти дистанцирующиеся гуппи крайне восприимчивы к заражению паразитами. Понятно, что в процессе эволюции поддерживалось проявление строгого дистанцирования теми, кто больше всего подвержен риску.

Тесные узы

Стратегическое социальное дистанцирование иногда означает поддержание определенных социальных связей, даже если это повышает риск заболевания. Мандрилы, высокосоциальные приматы с удивительными ярко окрашенными мордами,

Fairbanks), результаты которого были опубликованы в 2015 г. в *Behavioral Ecology and Sociobiology*, показало, что полосатые мангусты (*Mungos mungo*) не избегают членов группы, даже если у тех наблюдаются явные признаки болезни. Полосатые мангусты — высокосоциальный вид, обитающий в Африке южнее Сахары. Они живут в стабильных группах, насчитывающих до 40 зверьков и состоящих из членов семьи и неродственных особей. Между членами группы существует тесный физический контакт: они отдыхают, тесно соприкасаясь, и по очереди чистят друг друга по принципу «услуга за услугу».

Кэтлин Александер (Kathleen A. Alexander) из Виргинского политехнического института, один из авторов исследования, первая обратила внимание на то, что у многих мангустов в ее районе наблюдений в Ботсване были видимые признаки заболевания новой формой туберкулеза, которая убивает за несколько месяцев. Фэрбенкс провела месяцы, тщательно отслеживая шесть групп, пораженных этой инфекцией, и наблюдая за всеми социальными взаимодействиями между членами группы. К удивлению исследователя, здоровые мангусты продолжали вступать в тесный контакт с явно больными членами группы. Они занимались чисткой шерсти больных особей так же активно, как и здоровых соплеменников, даже когда больные мангусты не могли ответить им тем же. Дистанцирование от больного члена группы, вероятно, просто не может поддерживаться у вида, у которого от тесного взаимодействия с другими особями во время охоты и защиты зависит жизнь.

Следуя за природой

Как и у других животных, у человека длинная эволюционная история инфекционных болезней. Многие из наших собственных форм поведенческого иммунитета, такие как чувство отвращения, возникающее в грязных или тесных местах, — вероятно, результат этой эволюции. Но современные люди в отличие от других животных обладают множеством преимуществ, когда инфекции находятся на пороге. Например, теперь мы можем мгновенно оповестить весь мир об угрозе заболевания. Такая способность позволяет нам ввести социальное дистанцирование еще до появления болезни в нашем локальном сообществе: эта тактика спасла множество жизней. Мы развиваем цифровые платформы коммуникации от электронной почты до групповых

видеочатов, дающих нам возможность сохранять физическое дистанцирование и при этом поддерживать некоторые социальные связи. Другие животные теряют социальные связи при фактическом удалении. Но, возможно, главное преимущество человека — способность разрабатывать сложные неповеденческие средства, такие как вакцины, которые предотвращают болезнь без необходимости коренным образом менять поведение. Вакцинация позволяет людям вести богатую активную социальную жизнь, несмотря на заразные болезни, такие как полиомиелит и корь, которые иначе уничтожили бы нас.

Однако когда заходит речь о прекращении распространения новых заболеваний, подобных COVID-19, мы находимся в той же лодке, что и другие животные. В этом случае, как и в природе, испытанная форма поведения, такая как социальное дистанцирование, — наше лучшее средство защиты, пока не будут разработаны вакцины или лекарства. Но, так же как и другие животные, мы должны использовать эту форму поведения стратегически. Подобно мандрилам и муравьям, мы можем поддерживать самые необходимые социальные связи и держаться дальше всего от тех, кто наиболее уязвим и кого мы можем заразить случайно. Успех американских мангустов в борьбе с опустошительным вирусом в Карибском море демонстрирует, что издержки социального дистанцирования в краткосрочном периоде, хотя они и серьезны, приносят большую выгоду для выживания в долгосрочной перспективе. Каким бы неестественным это ни казалось, нам надо лишь следовать за природой. ■

Перевод: С.М. Левензон

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Дэньюрт Л. Социальная жизнь бабуинов Амбосели // ВМН, № 3, 2019.
- Infection-Avoidance Behaviour in Humans and Other Animals. Valerie A. Curtis in Trends in Immunology, Vol. 35, No. 10, pages 457–464; October 2014.
- No Evidence for Avoidance of Visibly Deceased Conspecifics in the Highly Social Banded Mongoose (*Mungos mungo*). Bonnie M. Fairbanks, Dana M. Hawley and Kathleen A. Alexander in Behavioral Ecology and Sociobiology, Vol. 69, No. 3, pages 371–381; March 2015.
- Ecological and Evolutionary Consequences of Parasite Avoidance. J.C. Buck, S.B. Weinstein and H.S. Young in Trends in Ecology and Evolution, Vol. 33, No. 8, pages 619–632; August 2018.

БЕЛОЕ И ЧЕРНОЕ

Комплекс горы Воттоваара
в центральной части
Республики Карелия

ЗОЛОТО КАРЕЛИИ

Председатель Карельского научного центра РАН член-корреспондент РАН Ольга Николаевна Бахмет рассказала о том, как наука старается помочь поднять имидж региона, возродить его бывшие бренды и создать новые. Она уверена: сотрудничать с наукой и помогать ей экономически выгодно.



Член-корреспондент РАН О.Н. Бахмет

— Ольга Николаевна, недавно прочитал о том, что в КарНЦ идут работы по восстановлению популяции карельской березы.

— Это действительно так. Очень хочется сделать ее настоящим брендом Карелии и нашего научного центра. У нас сегодня под ее питомник отведено почти 40 га.

— В чем ценность карельской березы? Она тверже красного дерева?

— Она твердая, но дело не в этом, а в неповторимой узорчатой структуре, природа которой, кстати, до сих пор точно не установлена. Возможно, это последствия наследственного заболевания или действие вируса, или особенности произрастания и питания. Вот уже более пяти столетий из этой древесины изготавливают самую изысканную мебель, предметы интерьера и сувениры.

— Известно, что у П.А. Столыпина стол был из карельской березы.

— И менее известно, что именно из карельской березы, а не из золота Карл Фаберже изготовил в 1917 г. по заказу Николая II последнее свое пасхальное яйцо. Оно так и называлось — «Березовое» — и предназначалось в подарок матери императора Марии Федоровне.

— Но если карельская береза действительно представляет такую ценность, может, запатентовать ее как бренд с географической привязкой? А то, опасаясь, скоро самые богатые питомники появятся в Китае...

— Сочетание «карельская береза» уже стало устоявшимся выражением, следовательно, оно не подлежит патентованию. Тем более что и раньше она росла не только у нас. Так называемые природные очаги раньше встречались в странах Северной и Восточной Европы, реже — Центральной. Но сегодня большинство из них исчезли или находятся на грани исчезновения. Самые обширные по площади из оставшихся сейчас находятся в Беларуси, откуда, кстати, мы взяли несколько саженцев для нашего питомника. Получается, что, несмотря на само название «карельская береза», подразумевающее карельское происхождение, белорусы тоже могут претендовать на этот бренд. Просто потому, что сейчас она там распространена шире, чем у нас.

— Обогнали братья-белорусы?

— Это не они обогнали, а мы отстали. Но работы по восстановлению популяции, как я уже сказала, идут. Сейчас мы ведем переговоры с очень крупным инвестором, который готов заниматься промышленными посадками карельской березы. Он обратился к нам, поскольку простое семенное размножение не дает древесины должного качества. Даже если взять семенной материал у самой «чистокровной» карельской березки, с большой долей вероятности из него вырастет березка совершенно обычная. Причем о том, что у вас растет не то, что задумывалось, вы узнаете только через пять лет: только тогда начинают проявляться специфические фенотипические особенности карельского вида. Стопроцентно положительного результата позволяют добиться только технологии микрклонального размножения, значительных успехов по разработке которых добились сотрудники Института леса КарНЦ РАН.

— Первые признаки проявятся через пять лет. А до промышленного качества посаженные деревья когда дойдут? Лет через 15–20?

— Больше, через 25–30 лет. И все это время за растущими деревцами надо внимательно следить. Казалось бы, какой инвестор пойдет на такое? Но мы подсказали решение, которое поможет получить прибыль быстрее.

— **Каким образом? Подкармливать мощными удобрениями?**

— Нет. Можно для части посадок не ждать, когда они вырастут и окрепнут, а продавать как саженцы, как декоративную культуру. При хорошей гарантии качества они пойдут замечательно. Например, недавно на нас вышли представители компании, владеющей одной из главных туристических достопримечательностей Карелии — горным парком «Рускеала». Они хотят высадить в парке аллею карельской березы.

— **Продадите им саженцы?**

— Мы не коммерческое учреждение, а бюджетное, поэтому не продадим, а подарим. Мы их уже подарили нескольким детским садам Петрозаводска, школе искусств, лесотехникуму. Дети и подростки своими руками сажают карельскую березу, сами выращивают, получают такие городские мини-питомники. Это официальный муниципальный проект, получивший название «Будущее создается сегодня».

— **Но там ее высаживают в чисто декоративных целях. Инвестор, полагаю, будет ее выращивать в основном ради ценной мебельной древесины...**

— Мы сейчас продвигаем еще один проект по практическому использованию карельской березы. Работы эти начались почти 30 лет назад. Тогда возникла сложная экологическая ситуация в районе работы Костомукшского горно-обогатительного комбината. ГОК, изымая железную руду, получает на выходе большое количество пустой породы, которая складывается в большие отвалы. Это огромные, безлесные, мертвые холмы, которые при усилении ветра сильно пылят, загрязняя вредной пылью огромные территории.

— **Я еще слышал, что такие отвалы сильно фонят разными излучениями.**



— Там радиация, слава богу, за пределы нормы не выходит, тем не менее всем понятно, что с ними надо что-то делать.

— **Интегрировать обратно в природу.**

— Именно. В начале 1990-х гг. мы разровняли верхнюю часть одного из отвалов, пересыпали небольшим количеством торфа и высадили там саженцы карельской березы. Березки наши замечательно прижились, ни одна не погибла. Получился двойной эффект: мы добились снижения запыления и получили хорошие площадки для произрастания ценной древесной породы.

— **Тройной: сделали безжизненные индустриальные отвалы живыми, радующими человека и природу живописными и полезными лесистыми холмами.**

— Но когда мы предложили комбинату продолжить работу, там к этому отнеслись достаточно прохладно. Не хотят они тратить деньги на то, что принесет эффект через несколько десятилетий. Сейчас мы вновь подняли эту тему, уже на уровне республиканских властей. Они нас услышали и предложили использовать для посадок другие искусственно созданные пустые пространства. Может, не такие крупные, как на ГОК, но тоже не улучшающие экологию. Например, карьеры по добыче щебня, которых у нас очень много.

— **Можно не только березой засадить, но и еще какими-нибудь ценными породами. Будут «карьер-питомник березовый», «карьер-питомник дубовый» и т.д.**

— Береза в отличие от многих других древесных пород растет в наших условиях



Слева: узор древесины карельской березы
Сверху: яйцо «Березовое», изготовленное фирмой Карла Фаберже в 1917 г. из золота и карельской березы

довольно быстро. В случае с дубом времени уйдет значительно больше. К тому же у березы есть еще одно существенное преимущество: она ежегодно сбрасывает большие объемы листвы, которая, перегнивая, удобряет и постепенно восстанавливает почву.

ЧЕРНОЕ

— Но кроме карельской березы у нас есть и другие изюминки, которые тоже вполне могут стать нашими региональными брендами. В районе Онежского озера буквально под ногами лежит редчайший объект — шунгитовые сланцы. Это окаменевшие органические донные отложения. Шунгит по окраске темный, как антрацит, и плотный, почти как мрамор. По структуре это нечто среднее между графитом и алмазом. В составе «блестящего шунгита» содержание углерода доходит до 99%. Обычно несколько меньше, 90–94%, но встречаются и такие необыкновенно высокие показатели. Можете представить, насколько за счет этого плодородны насыщенные шунгитами почвы. В старину их называли «олонецкие черноземы». И это уникальная особенность заонежских территорий.

— Народ знал, где сесть.

— В Заонежье, к которому относится и остров Кижы, на Заонежском полуострове практически все земли, где встречается примесь шунгитов, были полностью распаханы еще в XVII–XIX вв. В 1990-х гг. мы пытались найти естественные, ненарушенные почвы на шунгитовых сланцах,



Карельский шунгит востребован в сельском хозяйстве, водоочистных технологиях, металлургии, строительстве, медицине

с огромным трудом обнаружили несколько нетронутых человеком площадок, на которых растет лес. Но эти места были исключительными и точечными, все остальное было распаханно.

— Насколько я знаю, шунгит используют не только как удобрение...

— Спектр его промышленного применения достаточно широк. Дробленый шунгит, например, применяют как сорбент в водоочистных сооружениях. Используют шунгит в металлургии, в строительстве; полированными черными шунгитовыми плитами украшены интерьеры Исаакиевского и Казанского соборов Санкт-Петербурга и станции Московского метрополитена. Есть и менее очевидные, но не менее интересные области применения. У нас сейчас идут совместные исследования с Военно-медицинской академией им. С.М. Кирова в Санкт-Петербурге в области его медицинского применения. Как оказалось, наночастицы шунгита дают хороший эффект при лечении ожогов.

— Он обладает еще и другими уникальными косметическими и медицинскими свойствами. В Петрозаводске в каждой палатке продают порошки, составы и кремы с шунгитом, которые очищают организм, разглаживают морщины, возвращают молодость...

— Ну, тут бы я не стала так радоваться. Все эти эффекты научно никак не подтверждены. Это скорее маркетинговый рекламный трюк. Плацебо.

— А я купил. Что же теперь, выбрасывать?

— Зачем выбрасывать? Используйте, вреда не будет. Но не ждите обещанных чудес. Когда в начале 1990-х гг. история с шунгитом только начиналась, его пытались использовать где только возможно. Вплоть до того, что его продавали для очистки в домашних условиях питьевой воды. Люди просто клали раздробленный шунгит в кувшин с водой, отстаивали ее и пили. Пытались даже ввести это в практику детских садов, чтобы дети росли здоровыми.

— Но вы же сказали, что шунгит можно использовать именно для очистки питьевой воды.

— Это делают по особой технологии, не так грубо. Кроме того, в некоторых выходах шунгитовых породах высока концентрация тяжелых металлов, которые при такой «очистке» могут переходить в воду.

— Значит, моим кремом все же лучше не пользоваться?

— Нет, для косметических целей шунгит берется в основном в Зажогинском месторождении, где такого загрязнения нет. Его можно использовать как сувенир и в кремах, если нет вреда. Людям нравится, они в это верят, так пускай используют.

ЖИВОЕ

— Кроме берез и шунгитов у нас хорошо развито форелеводство. Более 70% товарной российской форели поставляет Карелия. У нас сильная группа ихтиологов и гидробиологов, которые разрабатывают экологические обоснования, где ее можно выращивать, а где нельзя.

— А почему нельзя?

— Тут важно понимать механизмы формирования особенно ценных веществ в этих лососевых. В некоторых водоемах из-за местных особенностей — состава воды, температуры и т.д. — такие вещества вырабатываются хорошо, в каких-то плохо. Если мы хотим выращивать качественный продукт, надо знать, как и где это можно делать наиболее результативно. В нашем центре ведутся серьезные фундаментальные исследования в области физиологии растений. У нас работают сильные биологи, генетики, зоологи, группы по изучению флоры и фауны, по ареалам распространения охотничьих животных, по инвазиям животных. Кроме того, у нас трудятся замечательные специалисты — болотоведы.

— Изучают болота? А что их изучать, комариные рассадники? Осушить — и весь разговор. В СССР с ними не больно-то возились... Чем меньше болот, тем больше полей. Конечно, я это не серьезно, но так думают многие.

— И думают в корне неверно. Болото — мощный аккумулятор влаги и торфа, то есть углерода. Болота в таежной зоне — самый большой резервуар углерода. Они его поглощают из воздуха, связывают и откладывают в торф на долговременное хранение. А значит, болота помогают нам эффективно бороться с парниковым эффектом. В случае бездумного осушения этот депонированный углерод высвобождается в атмосферу. Поэтому с болотами следует обращаться очень осторожно. Так что работ у нас ведется много. И все это при достаточно скудном финансировании. Мы федеральная организация, поэтому и финансирование у нас идет напрямую из Москвы. Ранее часть научных изысканий, результаты которых дают серьезный



Северное сияние, которое участники комплексной научной экспедиции в Карелию наблюдали в августе

экономический эффект в Карелии, дополнительно финансировались из местного бюджета, но сейчас этого нет. К сожалению, у нас дотационный регион, на который еще и наложился экономический кризис.

— Вроде мы из него потихоньку выходим...

— Тем не менее еще десять лет назад на науку в республике выделялось в год 10–15 млн рублей.

— Маловато. Стоимость одной квартиры в Москве.

— Этого хватало на поддержание одного-двух проектов. Но это было, повторю, десять лет назад. Сегодня даже этого нет. И мне так обидно, когда я приезжаю, например, в Пермский или Красноярский край, где на науку в год выделяется 200–300 млн. Слава богу, в последнее время понимание того, что наука необходима, приходит не только к предпринимателям,



Горный парк «Рускеала»

но и к региональным властям. И если не материальную, то моральную поддержку от администрации мы уже получаем. Что немало.

— **На моральной поддержке ядерный реактор не построишь.**

— Вы не совсем правы. Реактор нам пока не нужен, но дело не в этом. Очень важно, когда влиятельный чиновник из администрации говорит: «К нам приходит крупный инвестор, мы вас познакомим, вы покажете им свои научные разработки, инвестор, возможно, будет и в вас деньги вкладывать». Несколько лет назад и такого не было. Так что дело науки продвигается с трудом, но продвигается. И это радует.

НЕЖИВОЕ

— Карелия известна своими озерами, большими и малыми. Наши Онежское и Ладожское озера по аналогии с великими озерами Америки позиционируются как Великие озера Европы. Они самые крупные, Ладога держит первое место, Онега — второе. Но у нас есть и другие совершенно неповторимые и пока малоизученные места, как, например, комплекс горы Воттоваара в центральной Карелии.

— **Не слышал про такое.**

— Удивительное место с нехарактерным для республики низкогорным ландшафтом. Там вы можете увидеть множество крупных окатанных валунов, находящихся в необычном положении. В основном это сейды — огромные валуны, которые стоят на маленьких камушках-подпорках. Ученые до сих пор спорят, представляют ли

собой эти сейды культовые сооружения саамов или же это сюрпризы, оставленные тающими и отходящими ледниками. В пользу рукотворного происхождения говорит название: в переводе с саамского Воттоваара — «гора победы». Но большинство ученых все-таки считают основным виновником их образования ледник, который сначала, двигаясь, приносил сюда эти гигантские валуны, а потом, тая, аккуратно опускал их на оказавшиеся у подножия относительно маленькие камушки.

— **Возможно, было и то и другое.**

— Возможно. Тем более что уже установлено: некоторые из небольших сейдов — совсем молодые новоделы, созданные съезжающими сюда со всего мира туристами — экстрасенсами, медиумами и мистиками, которые считают Воттоваара «местом силы». Мы там неоднократно бывали с комплексными экспедициями, в состав которых входили почвоведы, геологи, лесники, ботаники и т.д., проводили обследование этих уникальных природных комплексов.

— **Ту самую силу почувствовали?**

— У нас был интересный эпизод. Мы расположились лагерем у подножия. А недалеко стоял лагерь «искателей силы». Вечером к нам подошел увешанный множеством амулетов их главный адепт, утверждавший, что это место имеет сакральное значение. Никто с ним спорить не стал, только один наш сотрудник в сердцах сказал: «Не говорите чепуху, никакой мистической силы тут нет». На следующий день он единственный из нас на абсолютно голой, безлесной территории Воттоваара заблудился. Долго искал лагерь, сделал хороший крюк, а найдя сказал: «Зря я так вчера, погорячился».

— **Обидел природу.**

— В 2011 г. этот комплекс был объявлен республиканским ландшафтным памятником природы. Сейчас там планируется создать новую охраняемую природную территорию, национальный парк или ландшафтный заказник федерального уровня, в которую кроме Воттоваара войдет еще расположенное рядом озеро с совершенно особенной природой.

— **Не бойтесь, что туда поедут туристы, все затопчут и забросают пластиковыми стаканчиками?**

— Как раз наоборот. Дикие туристы и сейчас туда массово едут, те же экстрасенсы, про которых говорили и которые там строят свои сооружения. А статус охраняемой

территории поможет сохранить объекты. Культурный туризм всегда лучше, чем дикий. Этим выгодно отличается Рускеала — там обустроенная территория, туристическая инфраструктура. К тому же туристы еще оставляют там немало денег. В Воттоваара можно сделать, как и в Рускеала. Главное, чтобы нашлись люди, которые вложились бы в дело, просчитали маршруты, проложили дорожки, обустроили смотровые площадки, создали бы инфраструктуру.

— А это не помешает исследовательским работам?

— При хорошей организации бизнес и наука не мешают друг другу, а помогают, взаимодополняют друг друга. В том же Рускеала мы сейчас изучаем подземные штольни, которые посещают туристы, участвуем с этими исследованиями в крупном европейском проекте, планируем изучать пленки на мраморе. Там потихоньку все-таки происходит биоразрушение подземного пространства. На самом деле у нас там огромный спектр работ, в том числе определение возможной туристической нагрузки.

— Хорошо, когда предприниматель понимает, что сотрудничать с наукой полезно.

— Это понимание приходит постепенно. Еще несколько лет назад серьезного интереса к нашим разработкам не было, сейчас

же нас приглашают на самые разные объекты. Мы их тоже приглашаем. В прошлом году в Санкт-Петербурге на Форуме стратегов мы были единственной научной организацией, которая создала отдельную секцию, посвященную карельской науке, экологии, взаимодействиям с властью и т.д. Пригласили туда руководителя парка «Рускеала» А.Б. Артемьева. В этом году он уже сам у нас спрашивает: «Вы когда готовите секцию?» К Рускеала было привлечено внимание других регионов, чиновников, компаний — и это, возможно, даст дополнительный импульс для развития парка. А ведь когда-то заброшенный мраморный карьер Рускеала тоже привлекал исключительно диких туристов, экстремалов.

— То есть, чтобы сохранить объект, необходимо дикий отдых перевести в культурный, который культурных туристов притягивает, а диких — отталкивает?

— Совершенно верно. Тут нам стоит перенять опыт у соседней Финляндии. Северная страна, суровый климат, а туристы едут толпами. Потому что финны умеют обыгрывать туристические объекты так, чтобы они смотрелись естественно, причем делают это аккуратно и ненавязчиво. А другого такого места, как Воттоваара или Рускеала, вы не найдете больше нигде в мире. ■

Беседовал Валерий Чумаков

Рукотворное или природное происхождение сейдов комплекса горы Воттоваара — до сих пор дискуссионный научный вопрос



ЭКОНОМИКА

ИЗМЕРИТЬ ТО, ЧТО ВАЖНО

Валовой внутренний продукт (ВВП) — один из ключевых экономических показателей.

Одержимость им привела к снижению уровня счастья, ухудшению здоровья и некорректной оценке состояния окружающей среды.

По мнению ученых, пришло время заменить этот показатель

Джозеф Стиглиц



ОБ АВТОРЕ

Джозеф Стиглиц (Joseph E. Stiglitz) — профессор Колумбийского университета, главный экономист Института Рузвельта. В 2001 г. получил Нобелевскую премию по экономике. С 1995 по 1997 г. возглавлял Совет экономических консультантов при президенте США Билле Клинтоне. С 1997 по 2000 г. занимал должность главного экономиста и старшего вице-президента Всемирного банка. В 2008–2009 гг. возглавлял Комиссию по основным показателям экономической деятельности и социального прогресса (СМЕРСП), учрежденную президентом Франции Николя Саркози, а в 2013–2019 гг. — группу экспертов по разработке мер по обеспечению благосостояния и устойчивости в ОЭСР.



В

скоре после окончания Второй мировой войны многие страны выбрали валовой внутренний продукт (ВВП) в качестве ключевого показателя для оценки своего уровня процветания и благосостояния. ВВП измеряет объемы рынка, стоимость товаров и услуг, произведенных во всех отраслях экономики в течение определенного периода времени, как правило, за год. Со временем по этому показателю стали оценивать эффективность работы руководства той или иной страны. Неудивительно, что правительства считают рост ВВП одной из важнейших государственных задач. Однако стремление к росту ВВП — далеко не то же самое, что обеспечение благосостояния общества.

«ВВП измеряет все, — сказал сенатор Роберт Кеннеди, — за исключением того, что делает жизнь достойной». Это число не может выразить уровень здоровья и образования, равенство возможностей, состояние окружающей среды и многие другие показатели качества жизни. ВВП даже не измеряет важнейшие особенности экономики, такие как, например, ее устойчивость: движется ли она к краху или процветанию. Но оценка этого и подобных показателей и измерения в целом важны хотя бы потому, что они становятся руководством к действию. Американцы получили первое представление об этой причинно-следственной связи во время войны во Вьетнаме: акцент был сделан на «количестве тел» — еженедельной таблице с подсчетом убитых вражеских солдат. Опора на эту

патологическую метрику побудила Вооруженные силы США предпринимать операции, которые не имели иной цели, кроме как увеличение количества убитых. Слово пьяный ищет свои ключи под фонарным столбом лишь потому, что там светло. Акцент на подсчете тел не позволил увидеть общую картину: из-за этой бойни число вьетнамцев, готовых присоединиться к Вьетконгу, резко возросло и превысило число жертв.

Сегодня уже другой «подсчет тел» — жертв коронавирусной инфекции *COVID-19* — оказывается новым и весьма неплохим показателем социальной эффективности, который слабо коррелирует с ВВП. США — самая богатая страна в мире, чей ВВП составил более \$20 трлн в 2019 г. Не страна, а высокоэффективный экономический двигатель,

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Валовой внутренний продукт (ВВП) практически повсеместно используется для оценки состояния общества. На самом деле это лишь показатель активности рынка, не более.
- Мировой экономический кризис 2008 г. подчеркнул необходимость создания более эффективных способов измерения состояния и устойчивости экономики и общества.
- За последнее десятилетие ведущие ученые разработали целый набор показателей, отражающих состояние общества и экономики. Их цель — помочь странам ориентироваться на будущее, которого желают их граждане. Отдельные страны уже используют эти показатели в процессе принятия политических и экономических решений.

гоночный автомобиль, способный обогнать любого. Однако в июне в США было зарегистрировано более 100 тыс. смертей, в то время как во Вьетнаме (с ВВП \$262 млрд, что составляет всего 4% ВВП США на душу населения) смертность от COVID-19 была и остается нулевой. В Гонке, где на карту были поставлены человеческие жизни, эта менее процветающая страна легко обошла Америку на повороте.

Фактически американская экономика больше похожа на обычную машину, владелец которой избавился от запаски, чтобы сэкономить на бензине, — хорошая идея, пока не спустило колесо. Стремление повысить ВВП в ожидании того, что это само собой приведет к росту благосостояния, я называю ВВП-мышлением. И оно завело нас в тупик. Экономика, максимально эффективно использующая свои ресурсы в краткосрочной перспективе, покажет более высокий ВВП в текущем квартале или за отчетный год. Однако стремление максимизировать этот макроэкономический показатель приводит к тому, что на микроэкономическом уровне бизнес вынужден сокращать свои затраты и стремиться к достижению максимально возможной краткосрочной прибыли. Подобная близорукость неизбежно ставит под угрозу эффективность экономики и благосостояние общества в долгосрочной перспективе.

Например, некоторое время назад Министерство здравоохранения и социальных служб США с гордостью сообщало об эффективном использовании больничных коек: ни одна кровать не оставалась невостребованной. В результате когда коронавирусная инфекция добралась до Америки, на 1 тыс. человек приходилось только 2,8 больничных койки — гораздо меньше, чем в других развитых странах. Система здравоохранения не смогла вовремя и эффективно справиться с таким наплывом пациентов. Неоплачиваемый отпуск по болезни на мясокомбинатах увеличил прибыль предприятий в краткосрочной перспективе, что привело и к увеличению ВВП. Но в этом случае заболевшие рабочие не могли позволить себе остаться дома и были вынуждены выйти на работу, что привело к распространению инфекции. Аналогично в связи с тем, что Китай производил защитные медицинские маски по более низкой цене, США было выгоднее импортировать их из-за рубежа, чем производить самим. Вследствие этого после начала пандемии и резкого роста спроса на маски в самом Китае персонал многих больниц США испытал их острую нехватку. В итоге неустанное стремление максимизировать ВВП в краткосрочной перспективе нанесло вред здравоохранению, вызвало финансовую нестабильность, снизило экономическую устойчивость и эластичность, сделав американцев более уязвимыми к потрясениям, чем граждан других стран.

Вплоть до 2000-х гг. ВВП-мышление одерживало верх. В предшествующие десятилетия европейские экономисты, видя успех США в росте ВВП, поощряли и своих лидеров следовать экономической политике в американском стиле. Эта картина начала меняться после первых признаков кризиса банковской системы США в 2007 г. Так, президент Франции Николя Саркози осознал, что любой политик, настойчиво стремящийся к росту ВВП и пренебрегающий другими показателями качества жизни, рискует потерять доверие общества. В январе 2008 г. он попросил меня возглавить международную Комиссию по основным показателям экономической деятельности и социального прогресса (СМЕПСП). Перед группой экспертов стоял вопрос: каким образом страны могут усовершенствовать методы измерения своего благосостояния и социального прогресса? Саркози справедливо полагал, что измерение того, что делает жизнь достойной, станет первым важным шагом к осуществлению этого.

По совпадению наш первоначальный доклад 2009 г., вызывающе озаглавленный «Неверно оценивая нашу жизнь: почему ВВП не имеет смысла?», был опубликован сразу после того, как мировой финансовый кризис продемонстрировал необходимость пересмотра ключевых ортодоксальных принципов экономической теории. Доклад этот вызвал такой позитивный отклик, что Организация экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), аналитический центр которой обслуживает 37 ведущих мировых держав, решила продолжить работу с группой экспертов комиссии. После шести лет консультаций и дискуссий мы укрепили и усилили наш предыдущий вывод: ВВП необходимо свергнуть с пьедестала. Вместо этого каждая страна может составить свою собственную панель индикаторов, включающую ограниченный набор показателей, анализ которых помог бы направить развитие страны в сторону, наиболее приемлемую для ее граждан. В дополнение к ВВП, предназначенному исключительно для измерения рыночной активности, такая панель будет включать показатели здоровья, устойчивости и любых других ценностей, к которым стремятся люди данного государства, равно как и показатели неравенства, отсутствия безопасности и других вредоносных факторов, которые они стремились бы уменьшить.

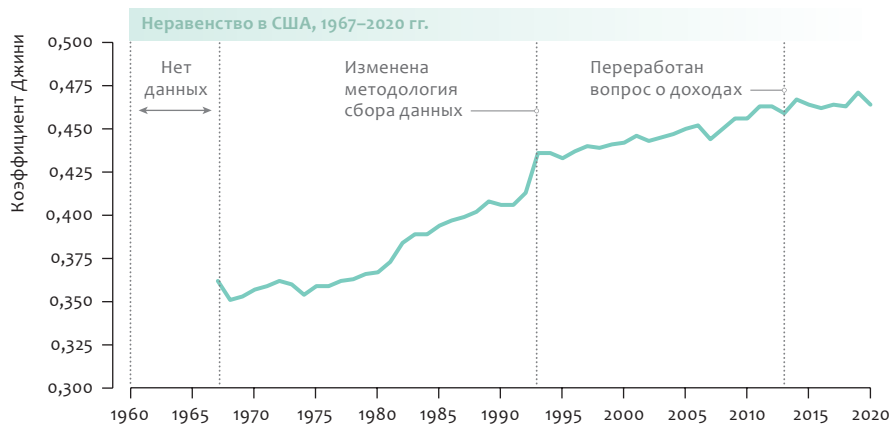
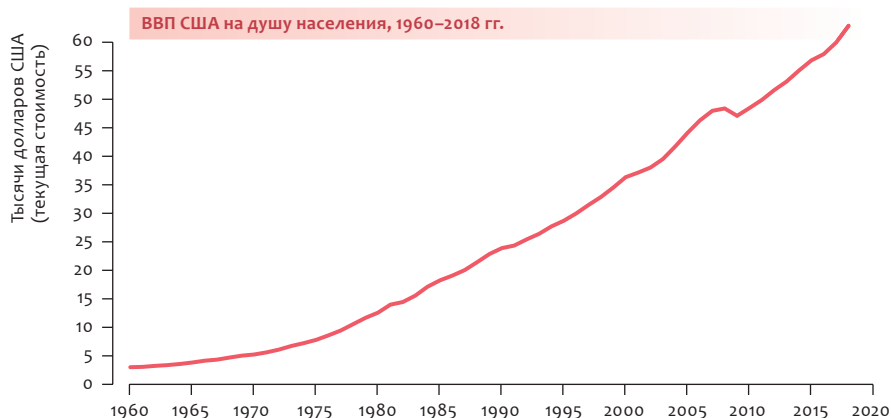
Опубликованные результаты исследований помогли явственнее обозначить глобальный процесс по улучшению методов измерения социального и экономического здоровья. В рамках своей инициативы под названием «Индекс лучшей жизни» ОЭСР рекомендует 11 показателей и дает возможность любому желающему оценить уровень жизни в своей стране и сравнить с другими, основываясь на параметрах, которые ему безразличны. Всемирный банк и Международный валютный

Измерение благополучия

Валовой внутренний продукт (ВВП) измеряет общее количество товаров и услуг, произведенных в экономике за определенный период, обычно за год. Несмотря на то что его часто используют для оценки состояния общества и экономики, это всего лишь мера рыночной активности, не более. После мирового экономического кризиса 2008 г. возникло глобальное движение, заменившее ВВП целой системой показателей — панелью индикаторов, которые могут помочь направить развитие страны в сторону более здорового и устойчивого будущего.

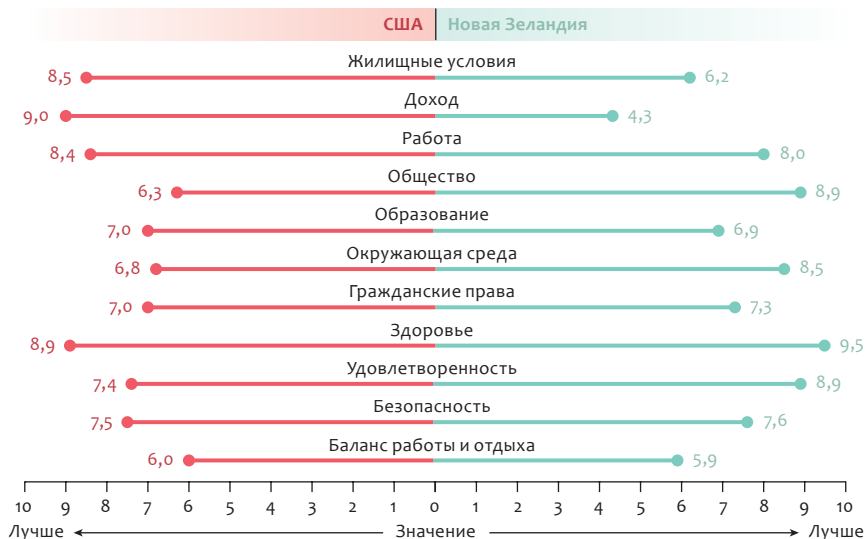
Израдная доля

ВВП на душу населения вычисляется путем деления ВВП на численность населения страны и может увеличиваться, даже если качество жизни большинства людей в стране ухудшается. Ключевым показателем расхождения между ВВП и социальным благополучием признано неравенство. Например, ВВП США неуклонно рос с 1960-х гг., однако при этом имело место и экономическое неравенство: три самых богатых человека в США обладают большим богатством, нежели вся более бедная половина населения страны. Пандемия лишь усугубила положение.



Качество жизни

Организация экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) разработала 11 критериев качества жизни. В таблице сравниваются показатели двух членов ОЭСР по этим критериям. Несмотря на то что доход на душу населения в США намного выше, чем в Новой Зеландии, последняя имеет лучшие показатели по качеству окружающей среды и здоровья, удовлетворенности жизнью, а также по чувству общественной и гражданской активности.



фонд (МВФ), традиционные и активные сторонники ВВП-мышления, теперь также уделяют внимание окружающей среде, неравенству и устойчивости экономики.

Несколько стран даже приняли этот подход в свои политические программы. Например, Новая Зеландия включила показатели «благополучия» в бюджет страны в 2019 г. По словам министра финансов страны Гранта Робертсона (Grant Robertson), «наша цель — сделать Новую Зеландию отличным местом и для жизни, и для заработка». Особое внимание к благополучию может частично объяснить победу страны над COVID-19, который, по-видимому, был ликвидирован после примерно 1,5 тыс. подтвержденных случаев заражения и 20 смертей при общей численности населения почти в 5 млн человек.

Яблоки и боеприпасы

Голь на выдумки хитра. Вышеописанная панель индикаторов возникла из острой необходимости и невозможности использовать ВВП как показатель благополучия, о чем свидетельствует мировой экономический кризис 2008 г. Но в свое время то же самое произошло и с ВВП. Едва ли во времена Великой депрессии официальные лица в США могли определить причины этого кризиса. Правительство не придавало значения сбору статистики ни по инфляции, ни по безработице, что помогло бы эффективно управлять экономикой. Поэтому Министерство торговли поручило экономисту Саймону Кузнецу из Национального бюро экономических исследований создать систему национальных счетов. В 1940-х гг. Кузнец продолжил разрабатывать концепцию ВВП как простого показателя, который можно было рассчитать на основе чрезвычайно ограниченных рыночных данных, доступных в то время. Совокупность всех товаров и услуг (в долларовом эквиваленте), произведенных в стране, была равноценна сумме всех доходов: заработной платы, прибыли, ренты и налогов. За эту и другие работы он получил Премию Шведского национального банка по экономическим наукам памяти Альфреда Нобеля в 1971 г. (Экономист Ричард Стоун (John Richard Nicholas Stone), создавший аналогичные системы национальных счетов для Великобритании, получил эту премию в 1984 г.)

Однако Кузнец неоднократно предупреждал, что ВВП измеряет только рыночную активность и его не следует принимать за показатель социального или даже экономического благополучия. Это безликое число включало в себя множество товаров и услуг, которые могли быть вредными (включая, по его мнению, боеприпасы) или бесполезными (финансовые спекуляции), или же исключало многие важные услуги, которые могли быть бесплатными (например, сектор домашних хозяйств). Основная сложность в создании

такого совокупного показателя заключалась в том, что не существует естественной и универсальной единицы измерения стоимости даже для яблок и апельсинов, не говоря уже о таких несопоставимых вещах, как боеприпасы, финансовые спекуляции или труд в домашнем хозяйстве. Поэтому экономисты пользуются ценами как показателями стоимости, полагая, что на конкурентном рынке цены отражают то, как люди оценивают яблоки, апельсины, боеприпасы, спекуляции или труд по отношению друг к другу.

Весьма сомнительное предположение о том, что цена измеряет относительную стоимость, позволило сильно упростить подсчет ВВП. По мере того как США восстанавливались после депрессии, наращивая производство и потребление материальных благ (в частности, вооружений и боеприпасов во время Второй мировой войны), ВВП быстро рос. Всемирный банк и МВФ начали финансировать программы развития в бывших колониях по всему миру, оценивая их успех почти исключительно с точки зрения роста ВВП. В дальнейшем экономисты еще больше сосредоточились на особенностях сравнения ВВП разных стран в различные периоды времени, на построении сложных экономических моделей, которые предсказывали и объясняли изменения ВВП, начисто упуская из виду относительную ценность и применимость этого показателя как такового. Даже студентам экономических факультетов не всегда рассказывали о допущениях, которые использовались при его подсчете, а также о том, какое значение эти допущения имели для достоверности любых сделанных ими выводов. Целью экономического анализа стало объяснение поведения этого искусственно созданного объекта. ВВП превратился в «мирового лидера»: хорошая экономическая политика отныне — та и только та, что эффективнее других способствует росту ВВП.

В 1980 г. после периода на первый взгляд низких экономических показателей и стагнации, отмеченной экономическим спадом и ростом цен, президент Рональд Рейган вступил в должность, обещая активизировать экономику. Он принял решение нарушить сложившийся баланс финансового сектора и снизил налоги для богатых, утверждая, что прибыль «тонкой струйкой просочится» к менее удачливым и обеспеченным. Несмотря на то что ВВП несколько вырос (хотя и был значительно ниже, чем в первые десятилетия после Второй мировой войны), неравенство резко увеличилось. Прекрасно отдавая себе отчет в том, что значения финансовых показателей сами по себе оказывают влияние на экономику и жизнь в целом, некоторые члены администрации выступали за прекращение сбора статистических данных о неравенстве. Чем меньше американцы знали бы о нем, тем меньше бы беспокоились об этом.



Администрация Рейгана инициировала беспрецедентную программу, напрямую угрожающую окружающей среде. Например, она выдала договоры аренды на добычу ископаемого топлива на миллионах гектаров государственных земель. В 1995 г. я вступил в Совет экономических консультантов при президенте Билле Клинтоне. Опасаясь, что существующие показатели уделяют слишком мало внимания истощению ресурсов и ухудшению состояния окружающей среды, совместно с Министерством торговли мы занимались разработкой нового экономического показателя — «зеленого» ВВП, который учитывал бы такие потери. Когда слух об этом дошел до представителей Конгресса США от угольных штатов, они пригрозили прекратить финансирование нашей программы, если работа не будет прекращена. Мы подчинились.

Если бы американцы поняли, насколько плохо уголь вписывается в картину «правильно измеренной» экономики, они немедленно потребовали бы отмены скрытых субсидий, которые получает угольная промышленность. И политики это прекрасно понимали. Возможно, это даже привело бы к ускорению перехода на возобновляемые источники энергии. Однако наши попытки по расширению существующих экономических показателей

потерпели неудачу. Впрочем, тот факт, что представители угольных штатов готовы были потратить существенную часть своего политического капитала для того, чтобы нас остановить, убедил меня в том, что мы движемся в правильном направлении и близки к открытию чего-то важного. И это также означало, что, когда десятилетие спустя Саркози обратился ко мне с просьбой возглавить международную комиссию для изучения более эффективных способов «измерения экономических показателей и социального прогресса», я с радостью ухватился за эту возможность.

Я покинул Совет экономических консультантов в 1997 г., а в последующие годы пыл эпохи Рейгана по разбалансировке экономики охватил и администрацию Клинтона. Финансовый сектор экономики США резко вырос, что привело к подъему ВВП. На деле же многие из тех прибылей, которые дали этому сектору такой вес, были в некотором смысле фальшивыми. Банковская практика кредитования привела к появлению на рынке недвижимости пузыря, искусственно увеличившего прибыль. Предполагается, что в идеальной рыночной экономике рост прибыли должен отражать повышение общественного благосостояния, однако банковские сборы это опровергают. В этом случае большая часть прибыли была результатом

ухудшения чьего-либо благосостояния. Например, в том случае, когда банки занимались недобросовестными действиями с кредитными картами или манипулировали ЛИБОР (Лондонской межбанковской процентной ставкой, выгодной для международных банков, кредитующих друг друга), чтобы увеличить свои доходы.

Тем не менее показатели ВВП приняли эти завышенные цифры за чистую монету, убедив политиков в том, что для наиболее эффективного роста экономики необходимо устранение оставшихся нормативных актов, ограничивающих финансовый сектор. Давние запреты на ростовщичество — взимание непомерных процентных ставок с целью воспользоваться неосторожностью заемщиков — были сняты. В 2000 г. был принят так называемый Закон о модернизации товарных фьючерсов (*CFMA*). Суть его заключалась в том, чтобы производные финансовые инструменты (деривативы, весьма рискованные договоры, которые внесли значительный вклад в разрушение финансовой системы всего лишь восемь лет спустя) никогда не регулировались. Принятый в 2005 г. закон усложнил процедуру банкротства для тех, у кого возникли проблемы с оплатой счетов, погашающих долги, а для обладателей студенческих займов это стало практически невозможным.

К началу 2000-х гг. две пятых прибыли корпораций приходились на финансовый сектор. Это должно было сигнализировать о том, что что-то идет не так: эффективный финансовый сектор должен повлечь за собой низкие затраты на участие в финансовых операциях, следовательно, его доля должна быть небольшой. В нашем случае она была огромной. Такое положение на рынке привело к росту прибыли, росту ВВП, но, как оказалось, и к нестабильности.

Опиоиды и ураганы

Пузырь лопнул в 2008 г. Банки без разбора выдавали ипотечные кредиты, предполагая, что цены на недвижимость будут продолжать расти. Вслед за пузырем, лопнувшим на рынке недвижимости, рухнула и экономика. Ситуация оказалась хуже, чем после окончания Второй мировой войны. После того как правительство США спасло банки (одна только страховая компания *AIG* получила правительственную помощь в размере \$130 млрд), показатели ВВП стабилизировались, убедив президента Барака Обаму и Федеральный резерв объявить, что страна уже на пути к восстановлению. Однако вследствие того, что 91% прироста доходов в период с 2009 по 2012 г. пришелся менее чем на 1% населения, большинство американцев этого просто не почувствовали.

Поскольку страна постепенно выходила из финансового кризиса, внимание на себя обратили другие проблемы: кризис неравенства, климатический

кризис и опиоидная эпидемия. Несмотря на то что ВВП продолжал расти, продолжительность жизни и другие показатели здоровья ухудшались. Продовольственные компании производили и с все возрастающей изобретательностью продавали продукты, богатые сахаром и вызывающие привыкание, тем самым способствуя росту ВВП и одновременно ускоряя эпидемию детского диабета. Опиоидная зависимость привела к эпидемии и резко возросло число смертей из-за наркотиков, однако прибыль фармацевтической компании *Purdue Pharma* и других участников этой драмы была учтена при подсчете ВВП. Мало того: в результате этих кризисов выросли расходы в области здравоохранения, что также увеличило ВВП. Затраты в сфере здравоохранения на душу населения в США вдвое превышали аналогичные во Франции, но продолжительность жизни была меньше. Аналогичным образом добыча угля, по всей вероятности, способствовала не только росту экономики, но и изменению климата, что привело к усугублению воздействия ураганов, таких как «Харви» в 2017 г. А все усилия по восстановлению и устранению последствий вновь добавили к ВВП. Этот показатель придал оптимистический блеск наихудшим из событий.

Приведенные примеры иллюстрируют различие между ВВП и общественным благосостоянием, а также то, что ВВП нельзя считать эффективным экономическим показателем. Рост ВВП до 2008 г. не был ни устойчивым, ни непрерывным. Увеличение банковских доходов, подпитывавших ВВП перед кризисом, происходило не только за счет благосостояния многих людей, которых эксплуатировал финансовый сектор, но и за счет ВВП в последующие годы. Рост экономического неравенства в любом случае нанес ущерб нашему обществу, однако ВВП праздновал успехи банков. Если когда-либо и происходило событие, указывающее на необходимость введения новых способов измерения экономических показателей и социального прогресса, то кризис 2008 г. безусловно был таковым.

Панель индикаторов

Комиссия, во главе которой стояли три экономиста: Амартья Сен (*Amartya Kumar Sen*) из Гарвардского университета, Жан-Поль Фитусси (*Jean-Paul Fitoussi*) из парижского Института политических исследований и я, — опубликовала свой первый доклад в 2009 г., сразу после краха финансовой системы США.

Фактически мы предложили ввести новые показатели экономического роста и благосостояния, вычисление которых было бы не сложнее, чем, скажем, подсчет доли американцев, испытывающих трудности с refinансированием своих ипотечных кредитов. Эти новые показатели смогли бы пролить свет на ключевые особенности бурного

экономического роста, предшествовавшего кризису, и, возможно, позволили бы политикам отразить его. Но еще важнее построение набора специальных показателей экономического роста, благосостояния и устойчивости (панели индикаторов), ориентированного на нынешний день с целью защитить общество от будущих потрясений.

Необходимо отдавать себе отчет в том, что происходит вместе с ростом ВВП. Увеличивается ли задолженность или истощаются ли природные ресурсы? Это может указывать на то, что экономический рост неустойчив. Если уровень загрязнения окружающей среды растет вместе с ВВП, такой рост нельзя считать экологически устойчивым. Хороший показатель истинного здоровья экономики — здоровье ее граждан. Если, как в США, ожидаемая продолжительность жизни снижается

Каждой стране нужна своя панель индикаторов — набор показателей, которые будут отражать состояние общества и экономики и помогать ими управлять

(и так было еще до пандемии), это должно вызывать беспокойство независимо от уровня ВВП. Аналогично если на фоне роста ВВП средний доход семьи находится в состоянии стагнации, это означает, что плоды экономического роста не распределяются должным образом.

Безусловно, было бы неплохо разработать единственный показатель, суммирующий и отражающий все особенности экономики и общественной жизни, например ВВП плюс какое-то число. Однако, как и в случае самого ВВП, при формировании единственного итогового значения теряется слишком много нюансов и ценной информации. Представьте, например, что вы едете на машине и хотите узнать свою скорость. Спидометр показывает 100 км/ч. Кроме того, вы знаете, что горючего хватит, скажем, на 200 км. Оба эти показателя несут важную информацию, которая так или иначе может повлиять на ваше решение продолжать путь. Но представьте, что вы сформировали какую-либо «совокупность» этих чисел, например сложив их. Что скажет вам число 300? Абсолютно ничего. Оно не укажет ни на стиль вождения, ни на ваше беспокойство из-за нехватки бензина.

Вот почему мы пришли к выводу, что каждой стране нужна своя панель индикаторов — набор показателей, которые будут отражать состояние общества и экономики и помогать ими управлять. Политики и соответствующие общественные

организации должны обращать внимание не только на материальное благосостояние, но также и на здоровье, образование, досуг, окружающую среду, экономическое равенство, управление, политические взгляды, социальные отношения, физическую и экономическую безопасность и другие индикаторы качества жизни. Не менее важно, чтобы эти «товары» не покупались за счет будущего. С этой целью обществу следует сосредоточиться на сохранении и, насколько это возможно, наращивании запасов природного, человеческого, социального и физического капитала. Нами также была создана программа исследований для изучения связей между различными составляющими благосостояния и экономической устойчивости, а также для разработки эффективных способов их измерения.

Всеобщая обеспокоенность по поводу климатических изменений и растущего экономического неравенства уже подпитывала спрос на более эффективные аналитические методы, и наш доклад лишь подтвердил эту тенденцию. В 2015 г. Организация Объединенных Наций завершила весьма спорный политический процесс, продолжавшийся три года, и опубликовала перечень из 17 так называемых Целей в области устойчивого развития (ЦУР). Прогресс в их достижении должен измеряться 232 показателями, отражающими многочисленные проблемы правительств и гражданского общества всего мира. На наш взгляд, бесполезно оперировать таким количеством цифр: за деревьями можно не увидеть лес. Вместо этого другая группа экспертов, возглавляемая Жан-Полем Фитусси, главным статистиком ОЭСР Мартин Дюран (Martine Dugand) и мной, рекомендовала каждой стране наладить открытый демократический диалог, чтобы выяснить, что волнует ее граждан больше всего.

Такой диалог почти наверняка покажет, что большинство из нас, тех, кто живет в высокоразвитых обществах, заботятся о своем материальном благополучии, здоровье, окружающей среде и социальных взаимоотношениях. Все мы хотим преуспевать не только сегодня, но и в будущем. Мы обеспокоены тем, как распределяются дивиденды нашей экономики, и не хотим жить в обществе, в котором прибыль достается несколькими избранным, а остальные живут в бедности.

Как уже было сказано выше, хороший показатель настоящего здоровья экономики — здоровье ее граждан. Снижение ожидаемой продолжительности жизни, даже для части населения, должно вызывать беспокойство, что бы ни происходило с ВВП. Пусть он даже растет. Важно не забывать, что если параллельно растет и уровень загрязнения окружающей среды, например в связи с выбросами парниковых газов или повышением концентрации твердых частиц в воздухе, то такой рост нельзя назвать экологически устойчивым.

Выбор показателей может меняться в разное время в различных странах. У кого-то высокий уровень безработицы, у других — ярко выраженное экономическое неравенство. Логично будет в каждой из этих стран выбрать соответствующий показатель. Тем не менее из-за естественного желания иметь возможность сравнивать уровень своего благосостояния с другими странами мы рекомендовали различным государствам использовать от пяти до десяти общих показателей.

Среди них будут и ВВП, и маркер, характеризующий степень экономического неравенства. За прошедшие годы экономисты разработали целый ряд показателей неравенства, каждый из которых отражает различные аспекты этого явления. Вероятно, что странам, наиболее остро столкнувшимся с этой проблемой, понадобится дополнительная информация. Например, им потребуются показатели, отражающие уровень бедности в крайней точке нищеты и избыток богатства при максимальных доходах. Лично мне всегда было важно знать, что происходит со средним доходом. В США, например, он почти не менялся в течение десятилетий, даже несмотря на рост ВВП.

Уровень занятости населения часто используется в качестве показателя макроэкономической эффективности. Очевидно, что экономика с высоким уровнем безработицы не применяет должным образом все свои ресурсы. Но в обществах, где оплачиваемая работа ассоциируется с человеческим достоинством, занятость сама по себе представляет ценность. В этом случае другими элементами панели индикаторов могут стать показатели ухудшения состояния окружающей среды (скажем, качества воздуха или воды), экономической устойчивости (наличие задолженностей), здоровья (ожидаемой продолжительности жизни) и отсутствия безопасности.

Оценка уровня безопасности (или ее отсутствия) может быть как объективной, так и субъективной. Можно провести исследования того, насколько неуверенно чувствуют себя люди, насколько они обеспокоены неблагоприятными последствиями какого-либо события или готовы ли они справиться с шоком. С другой стороны, можно, например, вычислить вероятность того, что кто-либо окажется за чертой бедности за определенный период времени.

Некоторые элементы панели индикаторов — это «промежуточные переменные», значения которых, конечно, могут быть ценными сами по себе, но основная их задача — формирование представлений о том, как общество будет функционировать в будущем. Один из таких параметров — доверие. Общества, в которых граждане доверяют своим правительствам и друг другу, как правило, работают лучше. Фактически общества с более высоким уровнем доверия, такие как Вьетнам и Новая

Зеландия, гораздо эффективнее справляются с пандемией, чем, например, США, где уровень доверия снизился со времен Рейгана.

Политики должны использовать эти показатели, как врачи используют свои диагностические инструменты. Как только тот или иной индикатор начал мигать желтым или красным, необходимо провести более серьезное исследование этой области. Если экономическое неравенство велико или увеличивается, важно задаться вопросом: какие именно составляющие неравенства ухудшаются?

Навигационная система

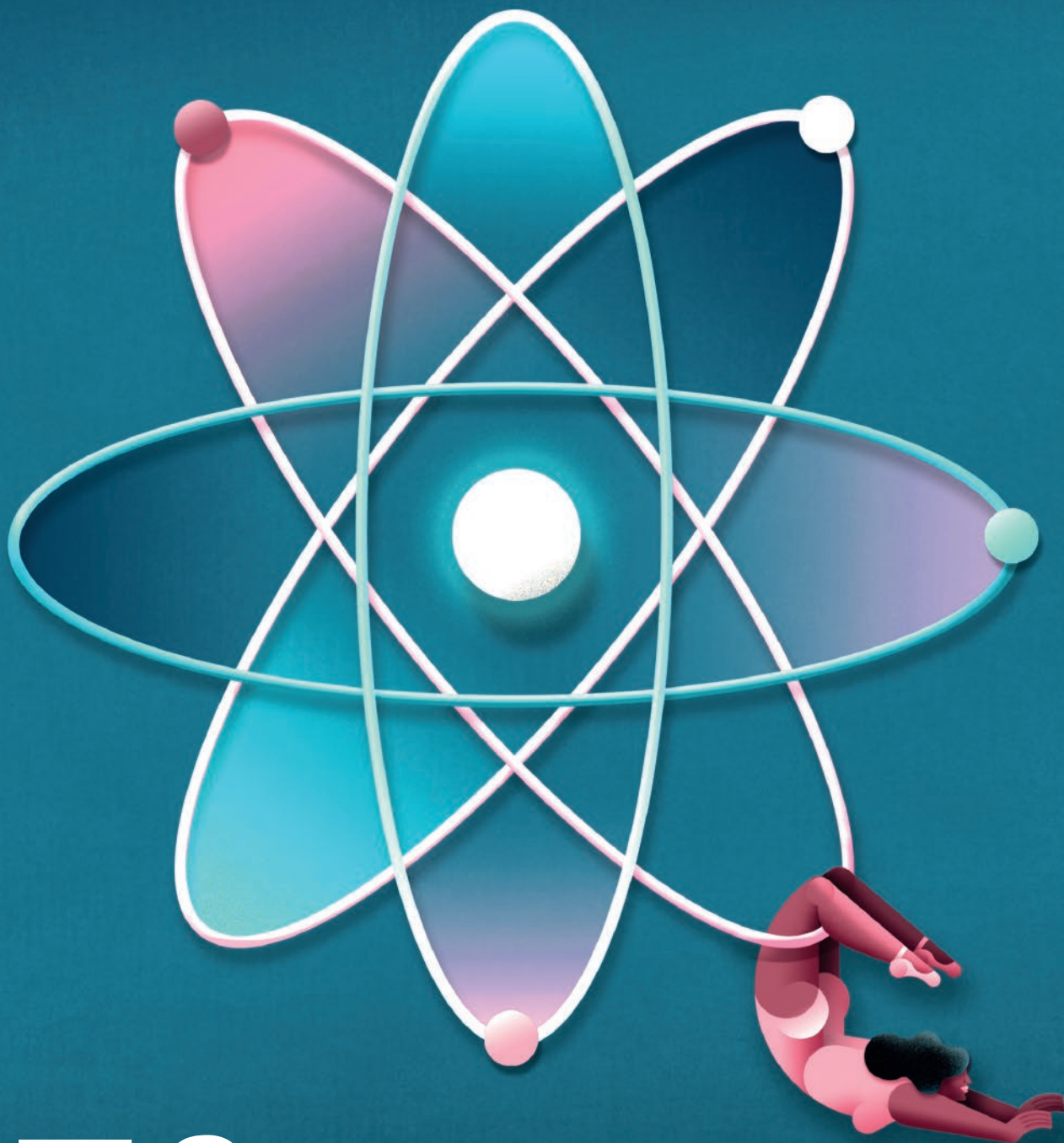
Работу над показателями благосостояния мы начали несколько десятков лет назад, и я был поражен тем резонансом, который вызвали наши исследования. Тщательный анализ отдельных элементов панели индикаторов стал неотъемлемой частью разработки политических программ во многих странах мира.

Каждые три года ОЭСР проводит международную конференцию для неправительственных организаций, статистиков, правительственных чиновников и ученых, занимающихся вопросами благосостояния. Последняя прошла в Корее в ноябре 2018 г., в ней приняли участие тысячи человек. Я уверен, что каждые три года на повестке дня этих конференций будет непременно стоять глобальный кризис, вызванный микроскопическим вирусом. Чтобы осознать все аспекты этой проблемы, могут потребоваться годы или десятилетия. А ведь ближайшее будущее готово бросить нам новые, не менее страшные вызовы: катастрофическое изменение климата и сокращение биологического разнообразия. Превосходная навигационная система — это минимум, необходимый нам для того, чтобы все это преодолеть. Можно сказать, что нам удалось создать подобные инструменты. Настало время их использовать. ■

Перевод: Д.С. Хованский

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Стиглиц Д. Нечестная экономика // ВМН, № 1–2, 2019.
- Стиглиц Д., Сен А., Фитусси Ж.-П. Неверно оценивая нашу жизнь: почему ВВП не имеет смысла? М.: Изд-во Института Гайдара, 2016.
- Стиглиц Д. Люди, власть и прибыль. Прогрессивный капитализм в эпоху массового недовольства. М.: Альпина Паблишер, 2020.
- Measuring What Counts: The Global Movement for Well-Being. Joseph E. Stiglitz, Jean-Paul Fitoussi and Martine Durand. New Press, 2019.

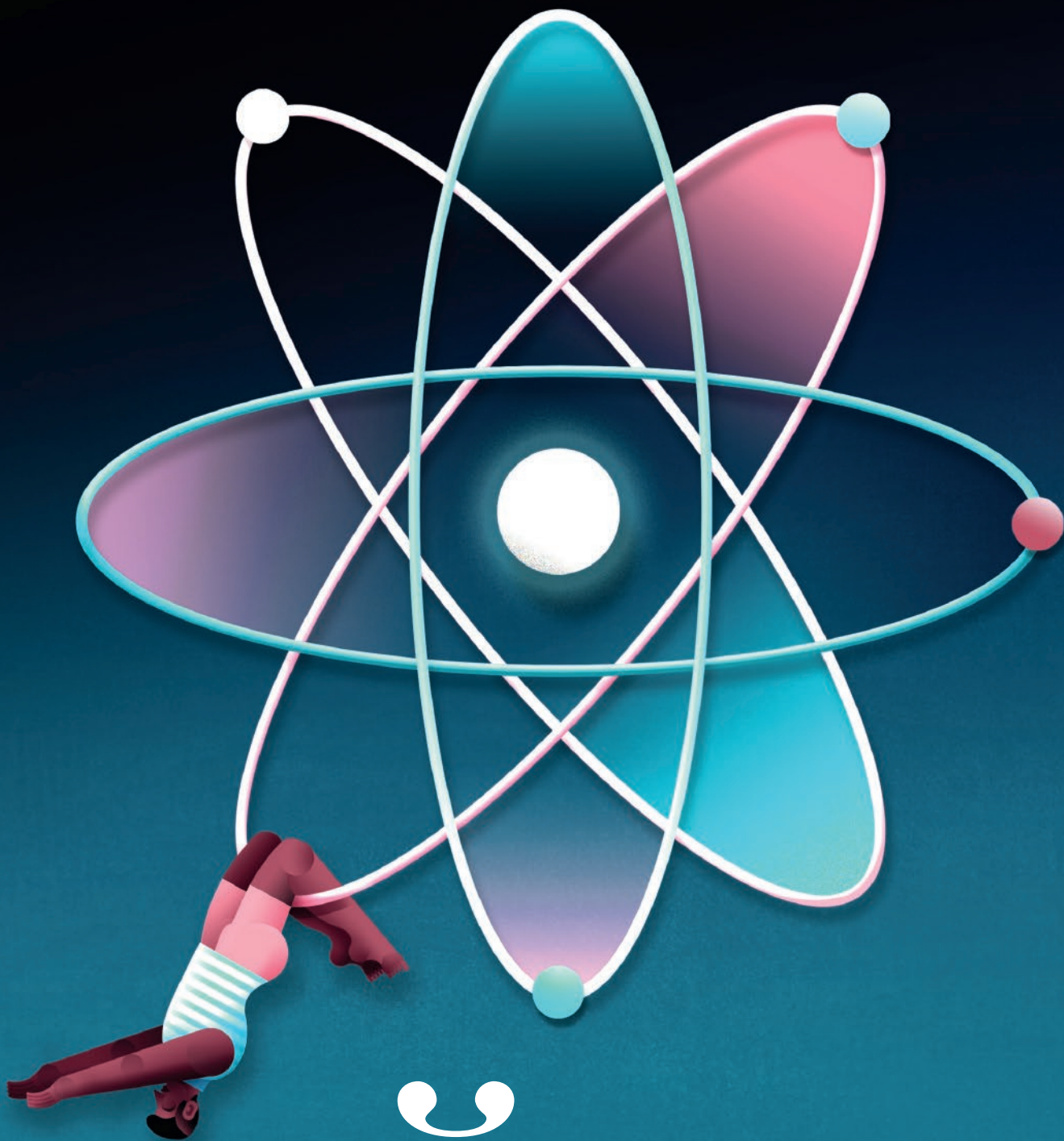


МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Кванто

Поиск решения одного из важнейших остающихся открытыми вопросов в физике: каким образом квантовое явление становится макроскопическим?

Спиридон Михалакис



ВЫЙ СКАЧОК

ОБ АВТОРЕ

Спиридон Михалакис (Spyridon Michalakis) — специалист в области математической физики и менеджер по связям с общественностью Института квантовой информации и вещества Калифорнийского технологического института.



Я

сажу один в председательском кресле большого конференц-стола, когда отдаленно знакомый голос приветствует меня: «Привет, ты, должно быть, Спирос!» Я обращаюсь и замечаю Пола Радда (Paul Rudd), голливудского актера, с его знаменитой обезоруживающей улыбкой. Он весь в поту, по пути с какой-то тренировки для супергероев.

Спустя несколько минут он и куча других киношников усаживаются вокруг меня. Радд сразу берет быка за рога: «Так какие же классные штучки происходят, когда ты становишься очень маленьким?» Я прилетел, чтобы проконсультировать по физике супергероя фильма «Человек-муравей» кинокомпании *Marvel*, и теперь я должен что-то объяснить. Но все, что я знаю об уменьшении до размеров муравья, почерпнуто мною в девятилетнем возрасте из фильма «Дорогая, я уменьшил детей!». На секунду я собираюсь сказать ему, что он обратился не по адресу, но никоим образом не хочу позволить этой возможности ускользнуть из моих рук. Может быть, я не очень много знаю о муравьях, но я знаю кое-что о квантовой физике. «Понятия времени и пространства теряют свое привычное значение, когда вы уменьшаетесь до размеров квантового мира», — отвечаю я с уверенностью. Оглядывая аудиторию, замечаю: это последнее, что они ожидали услышать. Но их зацепило. В течение следующих двух часов все внимание обращено ко мне, по мере того как я все глубже и глубже погружаюсь в законы и странности квантовой механики.

Днем позже один из продюсеров шлет мне электронное письмо: «Привет! Как нам назвать место, кудаходишь, когда уменьшаешься до микроскопического размера?» Я печатаю в ответ: «Как насчет квантового мира?» Пять лет спустя, в 2019 г., Мстители — персонажи фильма компании *Marvel* — попадают в Квантовый мир и возвращаются во времени, чтобы спасти Вселенную. Неожиданно приходит мысль, что, оказывается, быть экспертом по квантовой физике довольно круто.

Я не всегда увлекался физикой или героями комиксов. В колледже я специализировался на математике и информатике, а лето проводил, пытаюсь описать, как одномерные последовательности ДНК складываются в трехмерные белки. И только в аспирантуре я впервые записался на курс физики, выходящий за рамки базовых требований колледжа. Мой научный руководитель в Калифорнийском университете в Дейвисе решил записать меня на курс лекций по квантовой механике, который читали для аспирантов, и у меня не оставалось выбора, кроме как согласиться с этим. Когда в первый день занятий нам вручили односторонний тест уровня бакалавриата с целью оценить

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Квантовый эффект Холла — макроскопическое явление, представляющее собой электрический ток, текущий вдоль проводящей поверхности, который квантуется, — традиционно относят к микроскопическому квантовому царству.
- Объяснение того, почему это явление квантуется, было названо одной из важнейших нерешенных задач в физике.
- Недавно специалисты в области математической физики ответили на этот вопрос с помощью доказательства, основанного на топологии — теории, изучающей свойства форм.

наши знания, я вернул мой со своей фамилией и смайликом рядом с ней. Тем не менее я проявил упорство, окончив в июне 2008 г. аспирантуру со степенью в области прикладной математики в приложении к математической физике и квантовой теории информации. Через три месяца я собрал вещи и переехал в Лос-Аламос, штат Нью-Мексико, место рождения атомной бомбы, чтобы занять должность постдока в Лос-Аламосской национальной лаборатории. Тогда я еще не знал, что в течение следующего года с головой уйду в квантовый мир. Это рассказ о том, что я там обнаружил и как вернулся, чтобы поведать эту историю кинокомпании *Marvel*.

Нечто интересное

Все началось с простого вопроса. Мой научный руководитель в Лос-Аламосе Мэттью Гастингс (Matthew Hastings), восходящая звезда и один из самых проницательных умов в физике, сидел напротив меня в суши-ресторане, когда задал решающий вопрос: «Здесь, в лаборатории, в качестве постдока вы хотите начать с разминки или все же желаете поработать над чем-нибудь интересным?» Не прося дополнительных разъяснений, я ответил: «Хочу заняться чем-нибудь интересным». По-видимому, он остался доволен моим ответом. Позже в тот же день он прислал мне ссылку на список из 13 нерешенных проблем в физике, который составил и ведет Майкл Айзенман (Michael Aizenman), профессор Принстонского университета и выдающаяся фигура в математической физике. Я должен был заняться второй проблемой в этом списке — вопросом, поставленным специалистами в области математической физики Джозефом Авроном (Joseph Avron) и Руди Зайлером (Ruedi Seiler): «Почему квантуется холловская проводимость?»

Возможно, вы зададитесь вопросом, что такое проводимость по Холлу или что значит «квантуется». Тогда у меня возникли эти же вопросы. Ни одна из проблем в списке, кроме третьей, загадочно озаглавленной «Экспоненты и размерности», не была помечена словом «Решена!». Пролистав страницы, я увидел, что на самом деле она решена только частично. Однако одно из этих частичных открытий привело в 2006 г. к Филдсовской премии, одной из высших наград в математике, а за другое медаль Филдса будет получена четыре года спустя. Было ясно, что в такой компании задача, которую передо мной поставили, — не трудна, а чертовски трудна. Я тщательно обдумывал, смогу ли я решить такую задачу в течение года. Причина ограниченности временных рамок в том, что постдокторантура в математике или физике обычно длится два года. В конце первого года, если вы провели выдающееся исследование, вы можете обратиться в ведущие университеты для получения

профессорской должности с перспективой бессрочного контракта. Если ваше исследование хорошего уровня, но не выдающееся, вы можете подать заявку на вторую постдокторантуру или же искать профессорскую должность в менее престижном университете. Если вам нечего показать после первого года, всегда есть Уолл-стрит.

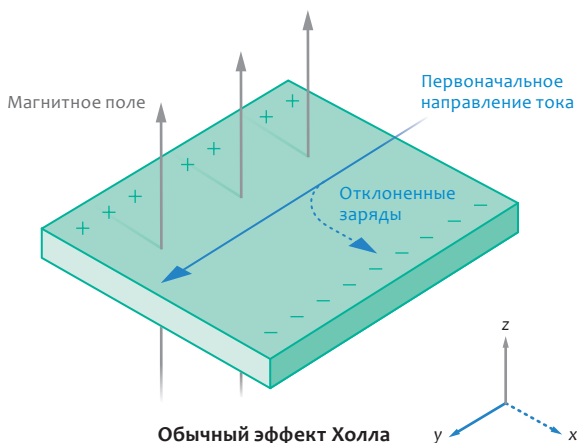
Тем не менее идею отступить уже сейчас, даже не попытавшись атаковать проблему, проглотить было трудно. Для человека, выросшего в Спате, небольшом греческом городке недалеко от Афин, грандиозные мечты были делом нетипичным. Мой отец вырос в том же доме, что и я. Он играл в футбол и был задирой. Когда в конце концов он бро-

В своем «Трактате об электричестве и магнетизме» Максвелл заявил, что в присутствии магнитного поля проводящий материал с током, текущим через него, будет изгибаться из-за магнитной силы, действующей на материал, а не на ток

сил школу, его отец предложил ему работу в местном продуктовом магазине. Мой отец отказался. Несмотря на то что он забросил учебу, у него были амбиции. Он прошел стажировку в местном агентстве по недвижимости и научился хорошо ориентироваться в покупке и продаже земли. Позднее по настоянию моей матери он вернулся в школу, чтобы получить аттестат о среднем образовании. Впоследствии, когда мой старший брат Никос принес домой табель успеваемости с отличными оценками, отец плакал от счастья, узнав, что его сын — примерный ученик. Мы с Никосом продолжили соревнование на Международной математической олимпиаде — честь, которой ежегодно удостоиваются по шесть учеников старших классов из каждой страны. Затем один за другим Никос, я и мой младший брат Мариос сменили среднюю школу в Афинах на колледж при Массачусетском технологическом институте в Кеймбридже — редкий успех для любой семьи, не говоря уже о семье со скромными средствами, и заслуга моих родителей. Я подумал, что если они могли творить чудеса, то, возможно, я тоже смогу. Итак, осенью 2008 г. я начал работать над проблемой номер два,

стремясь, как указано в списке, «сформулировать теорию целочисленного квантового эффекта Холла, которая объясняет квантование холловской проводимости так, чтобы она применялась также для взаимодействующих электронов в термодинамическом пределе».

Целочисленный квантовый эффект Холла имеет долгую историю. Эффект Холла был открыт в 1879 г. Эдвином Холлом, студентом Университета Джонса Хопкинса. Молодой Холл решил опровергнуть утверждение, сделанное отцом электромагнетизма Джеймсом Клерком Максвеллом. В своем «Трактате об электричестве и магнетизме» (1873) Максвелл с полной убежденностью заявил, что в присутствии магнитного поля проводящий материал с током, текущим через него, будет изгибаться из-за магнитной силы, действующей на материал, а не на ток. Максвелл пришел к выводу, что «если заставить действовать на систему постоянной магнитной силой <...>, окажется, что распределение тока будет таким же, как если бы магнитная сила не действовала вообще». Чтобы проверить эту идею, Холл пропускал ток через тонкий лист золота, помещенный в магнитное поле, перпендикулярное его поверхности, и заметил, что его гальванометр (прибор, используемый для обнаружения малых токов) регистрирует ток, который указывает на существование напряжения (электрического потенциала) в направлении, перпендикулярном первоначальному направлению тока. Он пришел к выводу, что магнитное поле подталкивает электроны тока к одному краю проводника, постоянно изменяя их распределение на поверхности материала. Максвелл оказался неправ. Это неожиданное появление зарядов [противоположного знака] по краям проводника стали называть напряжением Холла.



Квантовый эффект Холла первым обнаружил немецкий физик-экспериментатор Клаус фон Клитцинг спустя почти 100 лет, 5 февраля 1980 г., в Гренобле, Франция. Его целью было более тщательно изучить эффект Холла

при сверхнизких температурах и сильных магнитных полях. Он искал небольшие отклонения от ожидаемого эффекта в некоторых двумерных полупроводниках, материале, лежащем в основе всех современных транзисторов. В частности, он пытался измерить сопротивление Холла, величину, пропорциональную напряжению Холла. То, что он наблюдал, было удивительным: сопротивление Холла было квантованным! Позвольте объяснить. По мере увеличения напряженности магнитного поля сопротивление между краями материала остается одинаковым, пока поле не становится достаточно высоким. Затем, вместо того чтобы постоянно расти, как первоначально наблюдал Холл и предсказывали все известные физики того времени, сопротивление подскочит до нового значения. Еще более удивительно то, что значения проводимости Холла, величины, обратной сопротивлению Холла, были точными целыми числами, умноженными на величину, тесно связанную с постоянной тонкой структуры, фундаментальной постоянной природы, которая описывает силу электромагнитного взаимодействия между элементарными заряженными частицами. Целочисленный квантовый эффект Холла явил себя миру.



Квантовый эффект Холла

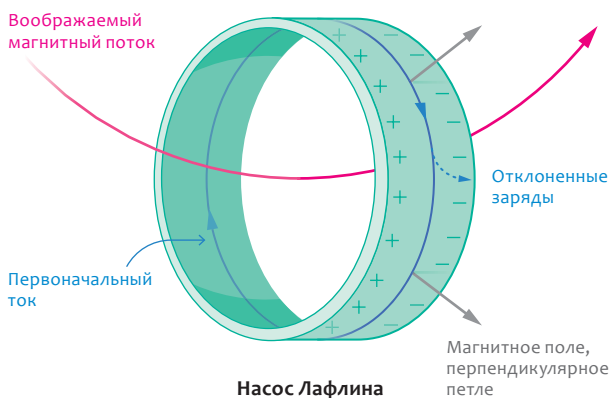
Открытие фон Клитцинга было поразительным, не в последнюю очередь потому, что, как считалось, постоянная тонкой структуры описывает аспекты квантового мира, которые слишком малы для любого макроскопического явления, такого как проводимость Холла, чтобы их можно было исследовать, не говоря уже о том, чтобы измерить с невероятной точностью. Тем не менее проводимость Холла не только охватила важный аспект микроскопического мира квантовой физики, но и сделала это с невероятной легкостью. Целочисленные плато сопротивления Холла появлялись независимо от размера, чистоты или даже типа полупроводникового материала, используемого в эксперименте. Словно симфонический оркестр из триллиона триллионов электронов поддерживал свою коллективную квантовую мелодию на огромных атомных расстояниях без какого-либо дирижера и, что еще более удивительно, был неподвластен принципам физики, которые

на протяжении миллиардов лет охраняли квантовое царство от незваных гостей из макроскопического мира.

В тот день была открыта дверь в квантовое царство — макроскопическая дверь, которая, как полагали многие, не существует. В 1985 г., спустя пять лет после открытия, Клаус фон Клитцинг был удостоен Нобелевской премии по физике. Его открытие приведет к другим выдающимся научным прорывам: еще три Нобелевские премии были присуждены двум экспериментаторам — Хорсту Штермеру (Horst Störmer) и Дэниелу Цуи (Daniel Tsui), а также теоретику Роберту Лафлину (Robert Laughlin) в 1998 г. за обнаружение того, что электроны, действующие совместно в сильных магнитных полях, могут образовывать новые типы «частиц» с зарядами, равными долям заряда электрона, — явление, получившее название «дробный квантовый эффект Холла».

Квантовый насос Лафлина

Роберт Лафлин был одним из первых физиков, попытавшихся объяснить квантовый эффект Холла. В 1981 г. он предложил блестящий мысленный эксперимент — идеализированную модель оригинального эксперимента, которая стала математической метафорой его понимания. Лафлин представил, что электроны движутся вдоль проводящей петли с плоским краем, наподобие обручального кольца. Магнитное поле проходит перпендикулярно поверхности кольца, но Лафлин добавил воображаемую линию магнитного поля, называемую магнитным потоком, проходящего через середину петли, как палец сквозь кольцо. Увеличение воображаемого потока индуцировало ток, идущий по петле, таким образом вводя продольный ток, присутствующий в классическом эффекте Холла. В процессе, получившем название «квантовый насос Лафлина», полный цикл завершается всякий раз, когда воображаемый магнитный поток увеличивается на один «квант потока» — величину, определяемую как h/e , где h — постоянная Планка, а e — заряд электрона.



После каждого цикла квантовая система возвращается в свое исходное состояние в результате явления, известного как калибровочная инвариантность. Лафлин утверждал, что это возвращение в исходное состояние предполагает, что проводимость Холла квантуется в целых числах, равных количеству электронов, перемещаемых квантовым насосом. Великолепно! Но, увы, существовала проблема. Проводимость Холла была экспериментально измерена (и усреднена) по большому числу циклов работы насоса. Поскольку Лафлин предположил (правильно), что система описывается квантовой механикой, не было никакой гарантии, что в каждом цикле участвует одинаковое количество электронов. Как позже напишут Аврон и Зайлер со своим сотрудником Дэниелом Осадчим (Daniel Osadchy): «Только в классической механике точное воспроизведение предыдущего состояния гарантирует воспроизведение предыдущего результата измерения. В квантовой механике воспроизведение состояния системы не обязательно воспроизводит результат измерения. Поэтому из одной только калибровочной инвариантности нельзя сделать вывод, что в каждом цикле работы насоса переносится одинаковое количество электронов». Физикам нужен был новый набор идей, чтобы показать, что среднее число электронов, перенесенных за несколько циклов, — также целое число.

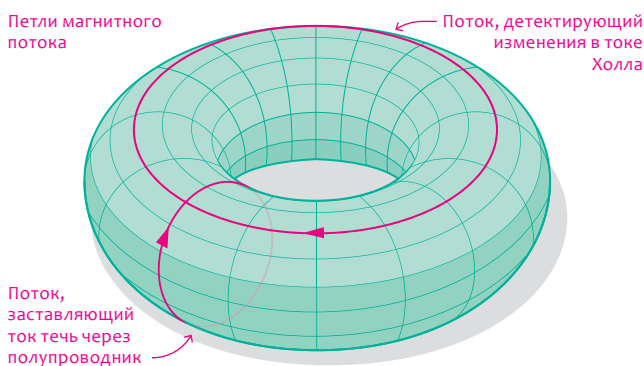
Вдохновленные аргументацией Лафлина, следующие попытки объяснить квантование проводимости Холла в значительной степени базировались на концепции адиабатической эволюции. Адиабатическая эволюция — это физический процесс, цель которого — запечатлеть эволюцию системы, которая все время находится в состоянии с самой низкой энергией, в то время как некоторые внешние параметры меняются. Когда спектральная щель системы — энергия, необходимая для ее перехода в возбужденное состояние, — становится небольшой, адиабатическая эволюция замедляется, чтобы предотвратить переход системы в возбужденное состояние. В исходной аргументации Лафлина это понятие используется для математического моделирования квантового эффекта Холла как адиабатической эволюции электронного состояния квантовой системы Холла при увеличении воображаемого магнитного потока.

Нерезываемая пластилиновая фигура

Чтобы глубже изучить квантовый эффект Холла, физики обратились к разделу математики, называемому топологией. Топология — это способ изучения фундаментальной сущности форм — свойств, которые не изменяются даже при их непрерывной деформации. Представьте что-то вроде пластилиновой фигуры, которую невозможно разорвать и которую невозможно приклеить

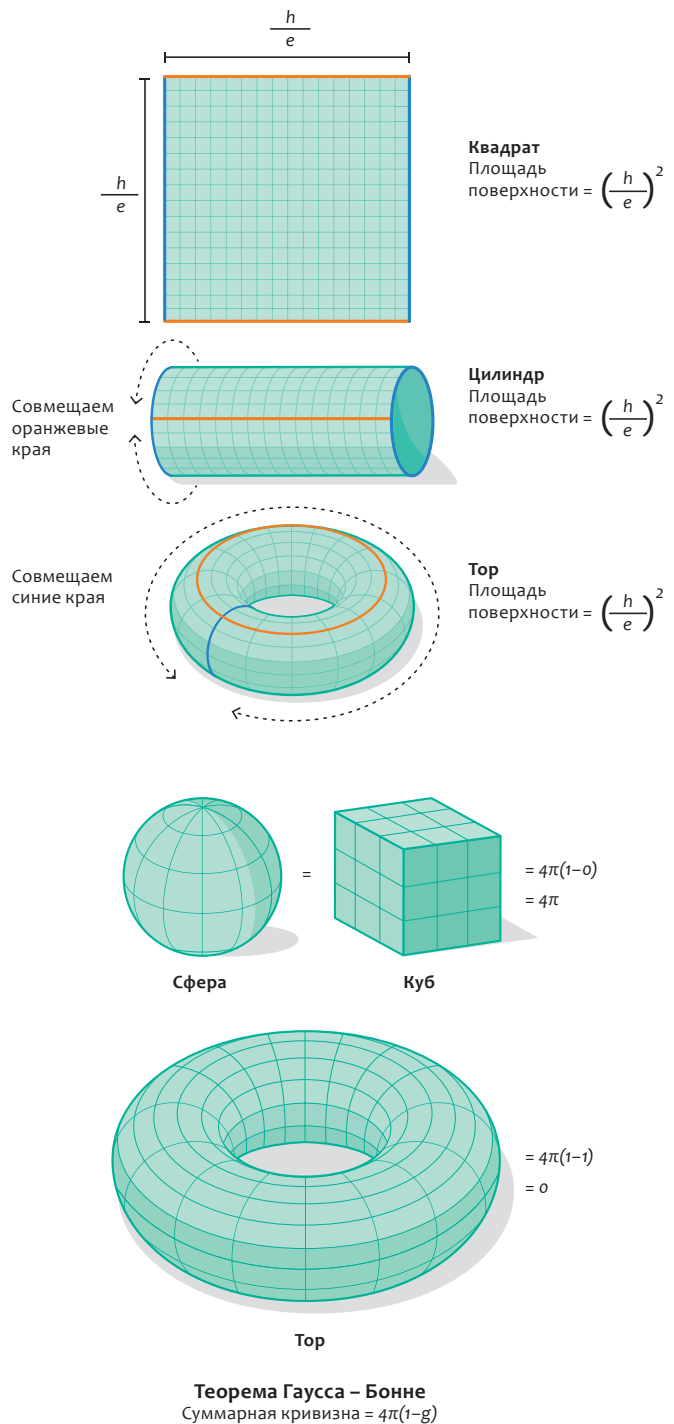
саму к себе. Куб из этого вещества вы можете превратить в шар, скругляя его острые края и углы, но превратить его в пончик невозможно. Последняя трансформация потребовала бы либо пробить дыру в кубе, либо растянуть и приклеить его самого к себе. В этом смысле кубик и пончик имеют топологически различную форму, а вот кубики и шарики топологически одинаковы (хотя геометрически все они различны). Топология была формализована в 1895 г., но редко взаимодействовала с физикой до 1950–1960-х гг.

Интересно, что первоначальные попытки понять роль топологии в квантовом эффекте Холла были признаны настолько значительными, что в 2016 г. физики-теоретики Дэвид Таулесс (David Thouless) и Данкан Холдейн (F. Duncan M. Haldane) получили за эту работу Нобелевскую премию. В частности, Таулесс и его сотрудники расширили доводы Лафлина, показав, что проводимость по Холлу квантуется в среднем. Поскольку для доказательства квантования одного воображаемого потока было недостаточно, они предложили второй воображаемый поток. В новом мысленном эксперименте один поток индуцировал электрический ток вдоль полупроводника, а другой фиксировал изменения тока между циклами насоса. Этот сценарий позволял моделировать циклы насоса Лафлина при различных начальных условиях. Адиабатическая эволюция, генерируемая дополнительным воображаемым потоком, играла роль усреднителя по многим циклам насоса Лафлина и показала, что средняя холловская проводимость квантуется.



Примерно в то же время Барри Саймон (Barry Simon), специалист в области математической физики из Калифорнийского технологического института, заметил, что адиабатическая эволюция наводит математический мост между проводимостью Холла и локальной кривизной двумерного фазового пространства, создаваемого двумя воображаемыми магнитными потоками. Эта локальная кривизна называется кривизной Берри в честь ее первооткрывателя, специалиста в области математической физики Майкла Берри (Michael Berry). В частности, Саймон показал, что холловская

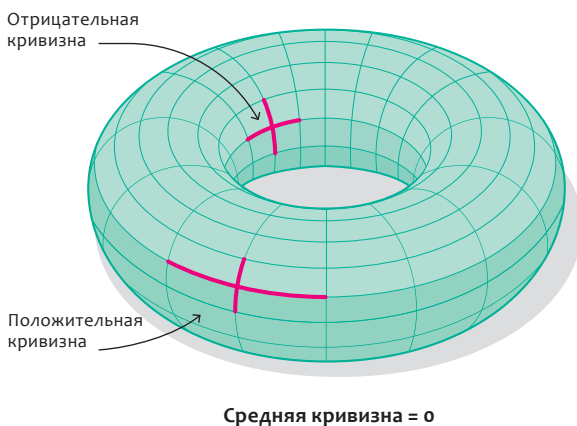
проводимость равна $h/2\pi$, умноженному на локальную кривизну в начальной точке этого фазового пространства. Это было важным результатом 1848 г., теорема Гаусса – Бонне, утверждает, что полная кривизна геометрической формы — характеристика топологическая, а не геометрическая. Другими словами, сумма всех локальных кривизн трехмерной формы одинакова для всех топологически эквивалентных фигур с одинаковой



площадью поверхности. Еще более впечатляюще то, что суммарная кривизна задается просто как $4\pi(1-g)$, где g — количество отверстий в форме.

Самое важное для нас — современное обобщение теоремы Гаусса — Бонне китайским математиком Шэншэнем Чженем (Shiing-shen Chern), показавшее, что тот же результат применяется для полной кривизны Берри нашего двумерного фазового пространства, описывающего квантовый эффект Холла. Кривизна Берри этого пространства теперь дается выражением $2\pi C$, где C — целое число, известное как первое число Чжэня. Чтобы показать, что проводимость Холла квантована, Саймон и его сотрудники рассмотрели среднее значение проводимости по всему фазовому пространству, которое равно $h/2\pi$, умноженному на (суммарную кривизну), деленной на (площадь поверхности). Подставляя $2\pi C$ (суммарная кривизна) и $(h/e)^2$ (площадь поверхности), получаем Ce^2/h . И вуаля: средняя проводимость по Холлу, как показал Таулесс, — целое число, умноженное на e^2/h . Однако впервые целое число перед e^2/h было отождествлено с «топологическим инвариантом» — свойством, которое не изменяется, если вы поворачиваете или изменяете форму объекта, — и, следовательно, результат был невосприимчив к небольшим возмущениям и несовершенствам в физической структуре квантового эффекта Холла. Это стало переломным моментом.

К сожалению, красота выводов Таулесса и Саймона, о которых рассказано выше, была омрачена серьезной проблемой: проводимость Холла, из-



меренная экспериментаторами, соответствовала локальной кривизне в исходной точке двумерного фазового пространства, а не средней кривизне по всему пространству. Чтобы понять, почему локальная кривизна произвольной формы почти никогда не равна ее средней кривизне, рассмотрим тор. Согласно теореме Гаусса — Бонне, средняя кривизна тора и любой другой формы с одним отверстием в ней равна нулю. Но локальная кривизна тора, очевидно, отлична от нуля в большинстве

точек его поверхности и может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Собственно, Таулесс и его коллеги пытались решить эту проблему, но все же оставался вопрос: почему проводимость Холла квантуется, если нельзя усреднять по всем возможным начальным условиям насоса Лафлина? Это и был вопрос, на который я должен был ответить.

Чувство отчаяния

Предполагалось, что мои первые шаги к загадке квантового эффекта Холла начнутся с изучения книги, написанной самим Дэвидом Таулес-

Через две недели после того, как я получил эту книгу от моего научного руководителя, я понял, что у меня не хватает знаний, необходимых даже для отдаленного понимания изложенной там физики. Я запер книгу в ящике своего стола и спрятал ключ

сом: «Топологические квантовые числа в нерелятивистской физике». Через две недели после того, как я получил эту книгу от Мэтта, моего научного руководителя, я понял, что у меня не хватает знаний, необходимых даже для отдаленного понимания изложенной там физики. Я запер книгу в ящике своего стола и спрятал ключ. Уже само существование этой книги вызывало у меня чувство отчаяния. Как мне добиться прогресса в решении проблемы, если я не в силах даже понять, о чем эта книга? На тот момент я был полным профаном. Конечно, у меня была возможность обратиться за помощью к Мэтту. Он мог бы научить меня тому, что мне необходимо было знать. Черт возьми, мы могли бы даже совместно работать над этой проблемой. Но примерно через месяц-другой после того, как я перебрался в Лос-Аламос, Мэтт сказал мне, что покидает лабораторию. Поскольку собеседования по трудоустройству теперь занимали большую часть его времени, я его почти не видел. Несколько месяцев спустя, когда ему предложили должность в отделении *Station Q* компании *Microsoft* в Санта-Барбаре, штат Калифорния, мои отношения с ним практически прекратились. Те несколько раз, когда мы все же встречались, убедили меня, что Мэтт допустил серьезную ошибку, предоставив мне

постдокторат в Лос-Аламосе. Из того, что он говорил, все, что я мог понять, — несколько отдельных словосочетаний. Одним из них, которое он постоянно повторял, было «квазиadiaбатическое продолжение», — абсолютно незнакомое мне понятие. К моему еще большему смятению, этот термин в огромной горе литературы, посвященной квантовому эффекту Холла, до того момента, похоже, нигде не встречался.

Не зная, куда двигаться дальше, я делал то, что сделал бы каждый молодой ученый моего поколения: гуглил словосочетания «квантовый эффект Холла» и «квазиadiaбатическое продолжение» (КАП). Первая фраза встречалась в сотнях научных работ, но продираться сквозь текст любой

Статья под названием «Топологический взгляд на квантовый эффект Холла», появившаяся в журнале *Physics Today*, предназначалась для физиков, не очень хорошо разбирающихся в этой области. Она была написана настолько ясно, что заложила основы моего понимания квантового эффекта Холла

из них мне было так же сложно, как и читать книгу Таулесса. Однако в результате этих поисков я нашел слово, которое постоянно появлялось в связи с квантовым эффектом Холла: «топологический». Когда я добавил это слово в строку поиска, первой в результатах стала статья Аврона, Осадчего и Зайлера под названием «Топологический взгляд на квантовый эффект Холла». Эта статья, появившаяся в журнале *Physics Today* в августе 2003 г., предназначалась для физиков, не очень хорошо разбирающихся в этой области. Статья была написана настолько ясно, что заложила основы моего понимания квантового эффекта Холла.

В противоположность сотням статей, посвященных квантовому эффекту Холла, мои поиски термина «квазиadiaбатическое продолжение» дали только два результата, и оба принадлежали Мэтту. Первая статья, написанная им в соавторстве с физиком-теоретиком Вэнь Сяоганом (Xiao-Gang Wen), была введением в квазиadiaбатическое

продолжение. Вторая среди прочих прикладных проблем содержала краткий раздел об использовании КАП для вычисления версии кривизны Берри, относящейся к дробному квантовому эффекту Холла. Это была первая и единственная опубликованная попытка применить КАП к какому бы то ни было типу кривизны Берри. Я был полон энтузиазма изучить выводы Мэтта от корки до корки. Но я все еще не понимал, что такое КАП и как оно связано с адиабатической эволюцией. Поэтому я углубился в первую статью — и после месяца ее обдумывания почувствовал, что хорошо разбираюсь в этой проблеме. Квазиadiaбатическое продолжение было предложено как эволюция квантовой системы, при которой сохраняются определенные топологические свойства ее квантового состояния. В отличие от него адиабатическая эволюция лучше подходила для локальных, геометрических свойств, таких как упомянутая ранее кривизна Берри.

Следующей задачей было придумать, как вычислить кривизну Берри, используя КАП. К моему ужасу, я не смог разобраться с кратким рассуждением Мэтта о том, каким образом можно навести мост между двумя понятиями. Я решил воссоздать этот мост (или, по крайней мере, свою версию) с чистого листа. Идея была в том, чтобы следовать рассуждениям Саймона, связывающим адиабатическую эволюцию с кривизной Берри, одновременно заменив адиабатическую эволюцию на КАП. Замена одной эволюции на другую замечательно сработала по одной простой причине — я смог показать, что квазиadiaбатическое продолжение было точно таким же, как и адиабатическая эволюция, при следующих особых условиях: в течение эволюции системы разрыв энергии между основным состоянием и первым возбужденным должен оставаться выше определенного положительного значения независимо от размера системы. К счастью, это особое условие выполнялось точно вблизи начала двумерного фазового пространства. Фактически, если бы это условие нарушалось, я мог бы показать, что проводимость по Холлу не квантуется.

Поупражнявшись в установлении связи КАП с кривизной Берри, соответственно, и с проводимостью Холла, я обратился к следующему трудному вопросу: воспроизведению рассуждений Саймона, который вычислил усредненную проводимость Холла как неизменяемую топологическую величину, которая дает первое число Чжена. Это был настоящий подвиг. Как я уже отмечал, чтобы преодолеть начальную проблему моделирования адиабатической эволюции с помощью КАП, я воспользовался тем фактом, что квазиadiaбатическое продолжение точно совпадает с адиабатической эволюцией, пока в его спектре существует достаточно большой разрыв между основным и возбужденным состояниями системы.

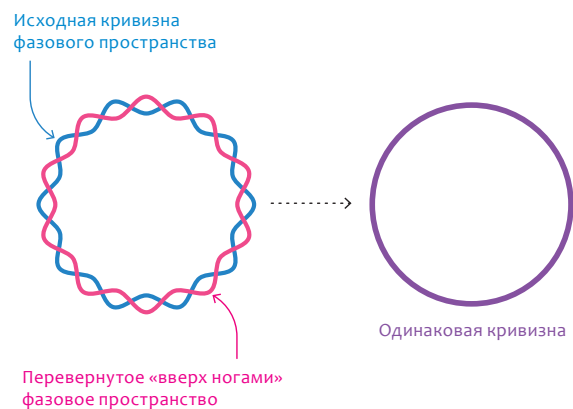
К сожалению, это предположение о спектральной щели сразу же вылетело в трубу, как только я начал более глубоко изучать двумерное фазовое пространство, полную кривизну которого мне требовалось вычислить. По сути, это предположение было настолько мощным, что его использовали во всех предыдущих попытках квантовать проводимость Холла. Другими словами, никто не предполагал, что квантование можно доказать без этого дополнительного предположения. И я в том числе. Когда в конце весны 2009 г. я наконец обратился к Мэтту с решением, в котором использовалось это ключевое предположение, он сказал мне: «Хорошая работа. Но, я думаю, ты сможешь доказать квантование и без него». Мэтт указал мне на свою, казалось бы, не имеющую отношения к предмету статью под названием «Теорема Либа — Шульца — Маттиса для пространств более высоких размерностей» (ЛШМ), в которой он заложил основы для устранения этого предположения.

Когда я начал продираться через статью Мэтта о ЛШМ, меня одолело такое же упадочническое настроение, какое возникло у меня, когда я пробовал разобраться с его попыткой связать КАП с кривизной Берри. Расшифровка его в одиночку должна была стать долгим и изнурительным путешествием. Но по второй иронии судьбы мой научный руководитель Бруно Нахтергеле (Bruno Nachtergaele), работая с одним из своих в то время постдоков, Робертом Симсом (Robert Sims), опубликовал то, что некоторые сочли математически строгой версией статьи Мэтта о ЛШМ. Хотя большая часть блестящих идей уже содержалась в оригинальной статье Мэтта, версия Бруно была настолько хорошо написана и тщательно продумана, что в течение месяца у меня сложилось четкое представление о том, как действовать дальше. Я наконец понял, как применить элементы ЛШМ, чтобы преодолеть второе препятствие, как показать, что усредненная холловская проводимость, вычисленная с использованием вместо адиабатической эволюции квазиадиабатического продолжения, остается целым числом, умноженным на e^2/h .

Исходные допущения, используемые в насосе Лафлина, чтобы добиться возврата к исходному состоянию системы после завершения цикла, — адиабатическая эволюция и калибровочная инвариантность — в случае с КАП не работают. Основная проблема заключалась в том, что при КАП после того, как введен квант потока, больше нет никакой гарантии, что в конце цикла система останется в том же квантовом состоянии. Адиабатическая эволюция проделала такой трюк, раз и навсегда запретив системе возбуждаться из состояния с самой низкой энергией. С другой стороны, у квазиадиабатического продолжения на этот счет были собственные соображения. Если по мере того как ученые будут все больше

и больше увеличивать магнитный поток, ширина спектральной щели упадет ниже критического значения, то КАП с радостью позволит системе перескочить в новое, возбужденное квантовое состояние, оставив позади свое низкоэнергетическое прошлое. К сожалению для меня, это означало, что в конце цикла Лафлина, даже если динамика, описывающая систему, вернулась в исходное состояние, квантовое состояние самой системы могло значительно измениться. Если бы это действительно было так, то ключевой элемент в выводах Лафлина и Таулесса улетучился бы.

Чтобы преодолеть это препятствие, в дополнение к исходным двум воображаемым магнитным потокам мне потребовалось ввести еще два (в общей сложности четыре), что дало мне возможность преобразовать эволюцию в условиях квазиадиабатического продолжения в такую, которая гарантировала бы в конце цикла безопасный возврат к исходному основному состоянию. Этот трюк, заимствованный мною из статьи Мэтта о ЛШМ, заставлял состояние системы сохранять одну и ту же энергию в течение модифицированной эволюции вокруг границы двумерного фазового пространства, даже когда эта энергия больше не соответствовала минимально возможной энергии системы. Другими словами, все, что требуется, чтобы гарантировать возврат системы в исходное состояние, — это чтобы оба состояния имели одинаковую энергию. Об остальном позаботилось то, что основное состояние системы однозначно определяется этой энергией. Требование, чтобы адиабатическая эволюция поддерживала систему в состоянии с наименьшей энергией на протяжении всей эволюции, было излишним. Что еще более важно, как я понял позже, требование использовать адиабатическую эволюцию для квантования холловской проводимости также стало причиной того, что прогресс остановился почти на два десятилетия.



Каждый из дополнительных потоков генерировал перевернутую версию фазового пространства, так что новое пространство имело равномерную кривизну

К тому времени я чувствовал себя разбитым. Но главное препятствие наконец-то было видно. Все, что я проделал до этого момента, — изящным способом показал то, что уже доказали Таулесс, Саймон и их сотрудники: усредненная холловская проводимость действительно квантуется в целых, умноженных на e^2/h . Казалось бы, я не добился прогресса в устранении предположения об усреднении, мешающего всем попыткам объяснить загадку целочисленного квантового эффекта Холла. За исключением одной незначительной детали: двумерное фазовое пространство, генерируемое КАП, имело почти идеальную постоянную кривизну Берри. Другими словами, реальная проводимость Холла, соответствующая кривизне Берри крошечного пятна около начала двумерного фазового пространства, была равна средней кривизне по всему пространству потока. Поскольку было хорошо известно, что последняя квантуется, следовательно, фактическая проводимость Холла также квантуется. Что и требовалось доказать.

Для преодоления этого последнего теоретического препятствия понадобилось много месяцев беспокойных дней и бессонных ночей. Несколько раз я чуть не сдался, прежде чем достичь цели. Както в особенно мрачное время я сказал маме, что не уверен в желании проснуться на следующее утро. В типичной греческой манере она ответила: «Если ты совершишь какую-нибудь глупость, я прилечу и задушу тебя своими собственными руками». Потерянному в мире гипераналитического мышления, мне нужно было как раз такое абсурдное утверждение, чтобы выкарабкаться из этого состояния. Доказательство я закончил в ноябре 2009 г., поделился им с Мэттом, который быстро добавил раздел о том, как результат можно обобщить, чтобы объяснить и дробный квантовый эффект Холла, а затем разместил его в интернете. Потребуется еще пять лет, прежде чем результат будет опубликован, и еще четыре, прежде чем физико-математическое сообщество сможет его полностью переварить. 25 февраля 2018 г. я получил электронное письмо от Майкла Айзенмана — письмо, которого я ждал восемь лет. В нем было написано:

«Дорогие Мэтт и Спирос!

Веб-страница "Нерешенные задачи математической физики" теперь дополнена сообщением о том, что вопрос о целочисленном квантовом эффекте Холла (QHE), опубликованный Йозефом Авроном и Руди Зайлером, решен в вашей совместной работе.

Настоящим я благодарю вас за ваш вклад, а также поздравляю вас с ним. Приятно отметить, что в каждой из двух проблем, о прогрессе в которых сообщается, прорыв был достигнут благодаря новым глубинным прозрениям и новым инструментам. Список решивших их — подлинная доска почета».

Фундаментальной загадкой, с которой мы начали, был вопрос о том, почему микроскопическое, квантовое явление проявляется в макроскопическом масштабе. Вместо этого мы обнаружили, что одна из фундаментальных констант природы — это отражение глобального порядка, находящегося вне пределов нашего конечного понимания, — бесконечного приращения к бесконечно малому. И хотя мы сосредоточили свое внимание на теории, лежащей в основе квантового эффекта Холла, эксперименты, которые он вдохновил за последние три десятилетия, были столь же, если не более захватывающими. Исследования топологических фаз материи за пределами двумерных квантовых систем Холла прокладывают путь к таким технологиям, как крупномасштабные отказоустойчивые квантовые вычисления. Впечатляющие результаты, полученные в таких лабораториях, как лаборатория Аны Марии Рей (Ana Maria Rey) в Колорадском университете в Боулдере, решают даже такие фундаментальные проблемы, как вопрос о природе времени.

Этот опыт также преподавал мне ценный урок: моя самооценка не связана с моим жизненным успехом. Тот самый телефонный разговор с моей мамой произошел за три месяца до того, как я добавил последние штрихи в решение задачи. Я не превратился в математического гения за несколько месяцев. Но я добился прогресса, разбив проблему на простые части, которые смог понять. Для этого мне нужно было спокойно относиться к чувству собственной некомпетентности, испытываемому большую часть времени. Без веры моих родителей в меня как личность, независимо от того, был ли я достаточно силен или нет, чтобы решить эту задачу, я бы сдался прямо перед финишем. Случись так, проблема, возможно, осталась бы нерешенной и Мстителям пришлось бы найти еще более невероятный с научной точки зрения способ спасти Вселенную, чем прыгнуть в Квантовый мир через макроскопический портал. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Вольф М., Кьюбитт Т., Перес-Гарсия Д. Неразрешимая задача // ВМН, № 12, 2018.
- Quantization of Hall Conductance for Interacting Electrons on a Torus. Matthew B. Hastings and Spyridon Michalakis in Communications in Mathematical Physics. Vol. 334, No. 1, pages 433–471; February 2015. <https://arxiv.org/abs/0911.4706>
- Open Problems in Mathematical Physics. http://web.math.princeton.edu/~aizenman/OpenProblems_MathPhys/index.htm

Всё, всем, всегда ДОСТУПНО



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

ЦИФРОВЫЕ РЕСУРСЫ

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

www.sciam.ru



Google play



**В мире
науки** SCIENTIFIC
AMERICAN

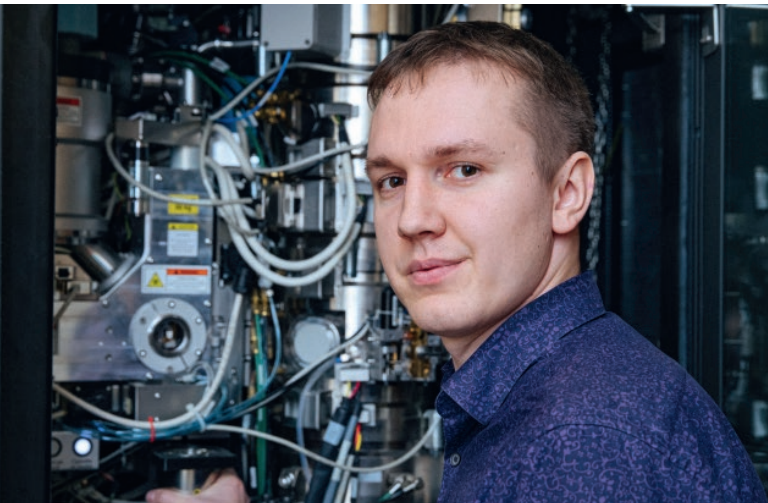
Ежемесячный
научно-информационный
журнал



РАЗГЛЯДЕТЬ

Невидимое

Человек с давних пор мечтал познать окружающий его, но невидимый невооруженным глазом мир. Попытки создания первого микроскопа предпринимались еще на рубеже XVI–XVII вв. Сам великий Галилео Галилей в 1612 г. конструирует устройство под названием *occhiolino* («маленький глаз»). Но, пожалуй, прорывом в микромир мы обязаны Антони ван Левенгуку, который изобрел самый простой и удобный в обращении оптический микроскоп. Современные приборы слабо напоминают этот знакомый всем со школьных времен микроскоп. Некоторые из них могут занимать целую комнату, но и по своим возможностям они позволяют буквально «разложить на атомы» любой объект. О том, зачем нам все это нужно, какие перспективы открывает и какие прорывы готовит современная микроскопия, рассказывают ученые из НИЦ «Курчатовский институт».



Алексей Валерьевич Овчаров, исполняющий обязанности руководителя ресурсного центра зондовой и электронной микроскопии «Нанозонд» отдела ресурсных центров Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий:

— Все началось с того, что в 2009 г. по инициативе М.В. Ковальчука была создана лаборатория электронной микроскопии. С течением времени лаборатория перешла в состав отдела ресурсных центров. Мы проводим совместные исследования с различными российскими институтами, но основное направление наших работ — внутренние проекты нашего центра. Например, в Курчатовском институте большое количество лабораторий, которые занимаются разработкой и синтезом разного рода материалов. Когда встает вопрос о микроструктуре и составе полученных материалов или, например, коллеги хотят визуализировать рост клеток на матриксах, они обращаются к нам.

— Для этого нужно какое-то особенное приближение?

— Да. С помощью оптической микроскопии мы это не увидим, а электронная микроскопия дает возможность изучить структуру исследуемых объектов вплоть до атомарных размеров.

— Какие задачи перед вами стоят?

— Перед нами огромное количество задач. Всю электронную микроскопию можно разделить на два направления: материаловедение и ряд биологических задач, то есть наука о живом. В материаловедении для нас сейчас актуальны такие проблемы, как исследование сверхпроводников, различных металлов, элементов нанoeлектроники, спинтроники, керамики

и геологических образцов. Мы изучаем также объекты культурного наследия, о которых с помощью современных методов электронной микроскопии можно получить новые, ранее неизвестные данные. В науке о живом у нас есть несколько обширных классов задач: определение трехмерной структуры макромолекул, вопросы клеточной биологии и медицины. Потенциал изучения таких объектов огромен.

— Мы сейчас наблюдали, как один из ваших сотрудников работает с криоматериалами. Фантастическое зрелище. Расскажите, что он делает.

— Чтобы работать с биологическими объектами, их нужно подготовить специальным образом. Для этого объект нужно заморозить, причем так, чтобы за счет сверхбыстро охлаждения образовался аморфный водяной лед, который не будет давать контрастного фона во время исследований. Вы видели, как Р.А. Камышинский выполняет эту процедуру, называемую витрификацией образца. Она нужна для того, чтобы сохранить исходную или естественную структуру исследуемого объекта, в данном случае клеток. После этого мы сможем подготовить с использованием фокусированного ионного пучка в криогенном режиме тонкую пластинку — ламель — для дальнейшего изучения с помощью просвечивающей криоэлектронной микроскопии (крио-ЭМ).

— Допустим, он получил такую структуру. Что дальше?

— Если в материаловедении мы можем видеть непосредственно атомные колонки в образце нового сплава или кристалла, то в крио-ЭМ на объект нельзя воздействовать большим потоком электронов, поэтому приходится работать в режиме низких доз и получаются крайне «шумные» изображения с низким контрастом. Один из способов решения этой проблемы — применение метода анализа одиночных частиц, который подразумевает использование набора из сотен тысяч, а иногда и миллионов проекций молекул (рибосом, вирусос, белков) во льду, находящихся в разных ориентациях, и потом с помощью высокопроизводительных вычислений мы сможем восстановить трехмерную структуру, а затем вписать в нее атомную модель. Проблема здесь не столько в том, чтобы получить крио-ЭМ-изображения, сколько в том, чтобы правильно их обработать; это длительный и трудоемкий процесс, который иногда занимает недели, иногда месяцы даже

с использованием ресурсов суперкомпьютера Курчатовского института.

— **У обывателей может возникнуть вопрос: зачем ученым все это нужно? Зачем рассматривать объекты, если это настолько долго и трудно? Что это дает?**

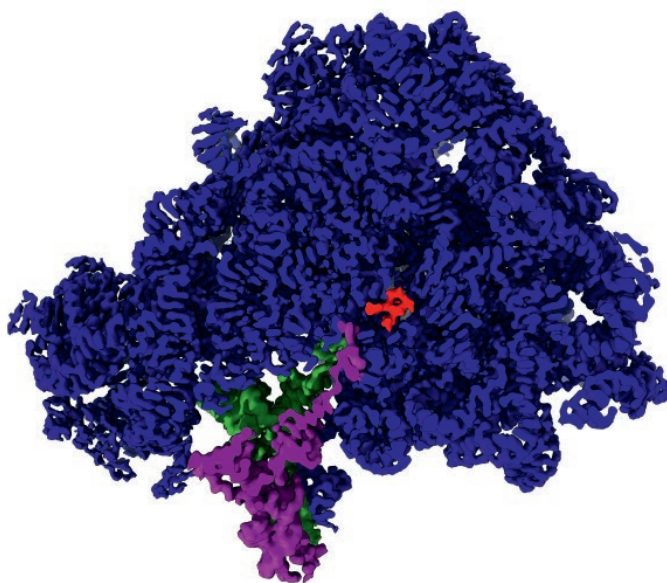
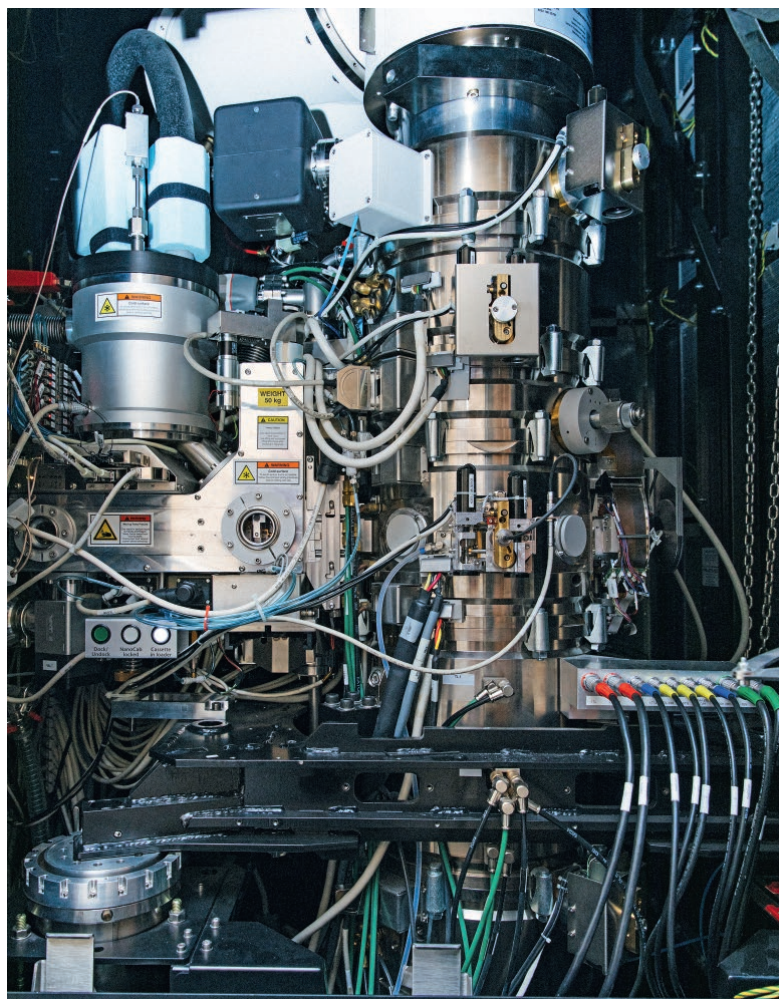
— Возьмем конкретный пример: допустим, у нас есть рибосома с антибиотиком. Как работают антибиотики? Мы все их иногда принимаем, но как они действуют, мало кто знает. Для многих антибиотиков какие-либо структурные данные и вовсе отсутствуют. С помощью крио-ЭМ мы можем определить молекулярный механизм работы антибиотика, структурные перестройки, возникающие в рибосоме при связывании с ним. Почему это интересно? Понимание механизма действия антибиотика на бактериальную рибосому способствует разработке новых лекарств, что особенно актуально в связи с развитием резистентности к ним патогенов. Не сегодня завтра мы можем столкнуться с тем, что появятся патогены, с которыми мы не сможем бороться. Это проблема номер один, и нам необходимо искать пути ее решения уже сейчас. Например, в случае рибосомы с антибиотиком диритромицином мы получили разрешение выше 2,1 ангстрема. Мы первыми в мире смогли получить структуру рибосомы с таким высоким разрешением. Данная работа ведется совместно с отделением молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ в Гатчине.

— **Вы сказали, что работаете с вирусами. С какими конкретно?**

— Не совсем так. Чтобы работать с действительно опасными вирусами в их естественном состоянии, нужно иметь специально подготовленную лабораторию с необходимым уровнем биологической защиты. В России такая лаборатория находится в Новосибирске — это всем известный «Вектор». Мы можем работать лишь с абсолютно безопасными частями вируса, например с белками, формирующими капсид, либо с так называемыми инактивированными вирусами, фактически вакцинами. У нас был проект по исследованию перспективной вакцины против гриппа. В настоящее время совместно с отделом структурной биологии комплекса ведутся работы по изучению структуры инактивированного вируса клещевого энцефалита.

— **Что нового о гриппе вы узнали?**

— Работа заключалась в том, чтобы получить структуру перспективной вакцины.



Вверху: внутреннее устройство просвечивающего криоэлектронного микроскопа

Внизу: крио-ЭМ-структура рибосомной субъединицы с антибиотиком



Процедура витрификации образца: подготовка (вверху) и выполнение (внизу)

Нам успешно это удалось, причем с разрешением, ранее доступным только для рентгеноструктурного анализа.

— **А исследованием коронавируса вы не занимались?**

— К настоящему моменту мы не проводили исследований коронавируса, хотя все технические возможности у нас для этого имеются. В перспективе мы могли бы заняться работой с инактивированными образцами.

— **Что представляет собой ваше оборудование, насколько оно уникально?**

— В нашем ресурсном центре представлен единственный в России криогенный электронный микроскоп, позволяющий получать структуры биологических макромолекул с высоким разрешением. В мире всего несколько сотен аналогичных приборов, но каждый электронный микроскоп по-своему неповторим. У микроскопа всегда есть некий набор основных узлов, электронная пушка, оптическая система, но каждая лаборатория индивидуально выбирает для решения своих задач конкретный набор аналитического оборудования, разнообразные детекторы и спектрометры. Конкретно наш микроскоп позволяет исследовать биологические объекты в нативном состоянии, в частности с помощью вышеупомянутого метода анализа одиночных частиц. Для решения задач клеточной биологии применяется комплементарный метод — криоэлектронная томография. Несмотря на более низкое пространственное разрешение, метод позволяет получить исключительно ценную информацию об ультраструктуре клеток и взаимном расположении молекулярных структур. Одна из последних работ, выполненных в нашем ресурсном центре совместно с отделом биотехнологий и биоэнергетики, посвящена исследованию структурных особенностей митохондриальных комплексов.

Если говорить о микроскопии для решения задач материаловедения, то ключевые направления исследований — изучение перспективных материалов спинтроники и наноэлектроники, различных сверхпроводников, включая традиционные, но очень важные для создания термоядерного реактора. Перед нами открывается новый, удивительный наномир, где царят свои законы, проявляется своя физика. К нам обращаются подразделения, которым интересно посмотреть, как на атомарном уровне происходит послыйный рост, например, пленок для спинтроники. Казалось бы, два одинаковых образца, но электрофизические характеристики различаются, причем иногда в разы, и нам надо ответить на вопрос, с чем это связано.

— **В чем же отличия?**

— С точки зрения атомной структуры вещества электронная микроскопия позволяет визуализировать дефекты, которые нельзя наблюдать другими методами. Бывает, из-за разности в параметрах атомной решетки накапливаются напряжения,

которые должны куда-то уходить. Мы можем увидеть, например, образование дислокаций и, в частности, визуализировать ядро дислокации. Кроме того, бывают такие задачи, когда нужно понять, почему добавки конкретного элемента оказывают сильное влияние на свойства материала. Бывает, что научные сотрудники выполняют проект, для которого необходимо понимание микроструктуры на атомном уровне. Мы — то подразделение, которое это понимание реализует. В частности, электронная микроскопия легко дает ответы на вопросы о концентрации того или иного элемента или группы элементов. С помощью аналитических методов можно определить тип соединения, выявить, находится ли оно в исходном состоянии или с чем-то соединилось и образовало новые вещества.

— Насколько важно то, что вы находитесь внутри Курчатовского института?

— Безусловно, расположение в Курчатовском институте имеет ряд неоспоримых преимуществ, связанных прежде всего с развитой инфраструктурой и возможностью взаимодействия с другими подразделениями центра, что позволяет обеспечить непрерывность и полноту проводимых исследований. В частности, здесь же находится Курчатовский синхротрон — уникальная научная установка класса «мегасайенс», единственный специализированный источник синхротронного излучения на всем постсоветском пространстве. В этом плане Курчатовский центр представляет собой уникальный научный организм, в котором есть все необходимое для решения подобных задач.

— Сформулированы ли конкретные планы на ближайшее будущее?

— Сейчас мы ведем несколько крупных научно-исследовательских работ с ведущими российскими институтами по структурной биологии — это та область, в которой очень высок интерес к электронной микроскопии, поскольку она позволяет исследовать живые системы в ранее недостижимых масштабах. Целый ряд перспективных мишеней для лекарственных препаратов — это белки, кристаллизация которых затруднена или невозможна, что существенно ограничивает их исследование классическими методами. А крио-ЭМ позволяет определить их структуру с разрешением не хуже, чем у рентгеноструктурного анализа. То же самое и в материаловедении. Это исследования в области металлов, используемых в реакторах,

сверхпроводники, материалы наноэлектроники. В коротком интервью все не перечислить.

— Ученые каких специальностей здесь работают?

— В основном это наши же воспитанники из Московского физико-технического института, с факультета ИНБИКСТ, для которого Курчатовский институт выступает базовой кафедрой. У нас работают также выпускники других ведущих российских вузов.

У нас есть работа как для физиков, так и для химиков и биологов. С момента появления криоэлектронного микроскопа для биологических исследований нам нужны кадры, которые не только разбираются в электронной микроскопии и понимают физику процесса, но и хорошо ориентируются в биологии и химии. Я сам физик-материаловед, окончил магистратуру МФТИ по направлению «Прикладная математика и физика», занимаюсь сверхпроводимостью.

В Курчатовском институте есть своя плотная линия по производству сверхпроводящих лент, и мы активно с ними сотрудничаем. Одна из задач ресурсного центра — осуществление контроля качества выпускаемых лент. Сейчас перед Россией стоит задача использовать для производства сверхпроводящих лент полностью российские исходные материалы, в том числе мишени для осаждения сверхпроводников. Мы изучаем, насколько подходят российские мишени для получения сверхпроводящих лент. Провода показывают хорошие электрофизические характеристики, и от мирового уровня мы не отстаем, хотя для нас это нечто новое и мы никогда раньше ничего подобного не создавали.

— Вы думаете, что со временем мы сможем все это делать сами?

— Мы стараемся, прикладываем максимальные усилия. Но, конечно, сталкиваемся с определенными проблемами. Все микроскопы в ресурсном центре зарубежного производства. Микроскоп — это, по сути, нанолaborатория, технические очень сложные устройства. Надо понимать, что если в нем что-то выходит из строя, то нам приходится обращаться к зарубежным коллегам, благо, у нас налажены связи с целым рядом ведущих специалистов в электронной микроскопии и инженеров, в основном наших соотечественников, которые работают за границей. Для мирового научного сообщества очень важно объединить усилия для достижения передовых результатов.



Александр Александрович Никитин, старший научный сотрудник лаборатории атомно-масштабных и ядерно-физических методов исследования НИЦ «Курчатовский институт» — ИТЭФ:

— Изначально наша лаборатория развивалась вокруг исследования реакторных материалов для ядерной техники. Это сравнительно новая инструментальная методика, получившая свое развитие в 1990-х гг., и здесь мы используем определенный вид микроскопии. Если говорить простыми словами, то это поатомная разборка материала. Наш микроскоп позволяет контролируемо отрывать отдельные атомы от образца, регистрировать химическую природу этих атомов и местоположение, откуда они были сняты.

— Как называется ваш микроскоп?

— Это атомно-зондовый томограф. Атомный — потому что мы отделяем отдельные атомы. Зондовый — потому что сам атом, который отделяется, служит зондом. Он прилетает на наш детектор, дает сигнал регистрации, и мы фиксируем его местоположение и химическую природу. А томограф — потому что итогом эксперимента становится томография разобранного материала. Здесь можно провести аналогию с компьютерной томографией, которую вам делают в поликлинике. Вы получаете информацию об исследованном образце в виде его срезов, трехмерных изображений — атомных карт, содержащих информацию о том, где и в какой позиции располагаются отдельные атомы в данном материале.

— Для чего вы это делаете? Что это дает?

— Наш микроскоп служит для разных задач. Первая — контроль качества материала. Сейчас, когда промышленность нацелена на создание так называемых наноструктурированных материалов, где свойства определяются тонкой структурой, это особенно важно. Зачастую данная структура состоит из хитро заданного технологическим расположением отдельных атомов в материале. Непосредственно после создания такого материала, когда он выходит с конвейера, требуется проконтролировать его качество. Это крайне важно, поскольку от этого может зависеть безопасная работа сложнейшего технологического устройства, а в конечном счете — наша с вами. На данном этапе наш микроскоп позволяет провести ту самую поатомную разборку и дать технологу обратную связь, чтобы понять, создан ли этот материал согласно его задумке или что-то пошло не так; действительно ли материал будет выполнять свои технологические задачи и располагать нужными характеристиками.

Кроме того, одно из дополнительных направлений, в рамках которых мы проводим исследования, — это анализ различных тонких воздействий на материал. В частности, мы исследуем воздействие ионизирующих излучений на структуру и свойства материалов. Эффекты, которые происходят в материале при соударении отдельных ионов или, допустим, нейтронов с его структурой, достаточно тонкие. Они тоже происходят на уровне отдельных атомов. И чтобы проследить, проконтролировать эти изменения, понять, как эти процессы происходят, также необходима поатомная разборка. Наш микроскоп предоставляет информацию о материале до воздействий и после. Затем мы проводим сравнительный анализ и определяем, какие элементы в данном процессе играют ключевую роль.

— Я слышала, что этот микроскоп уникален. В чем его особенность?

— Этот микроскоп уникален для нашей страны. До появления таких приборов поатомная разборка материала представлялась невозможной. Конечно, были другие методики, которые давали и качественную, и количественную информацию, но именно на таких масштабах взаимодействия отдельных атомов информации еще не было. Как раз в этом и заключается беспрецедентность нашего микроскопа. В России таких микроскопов три, и все

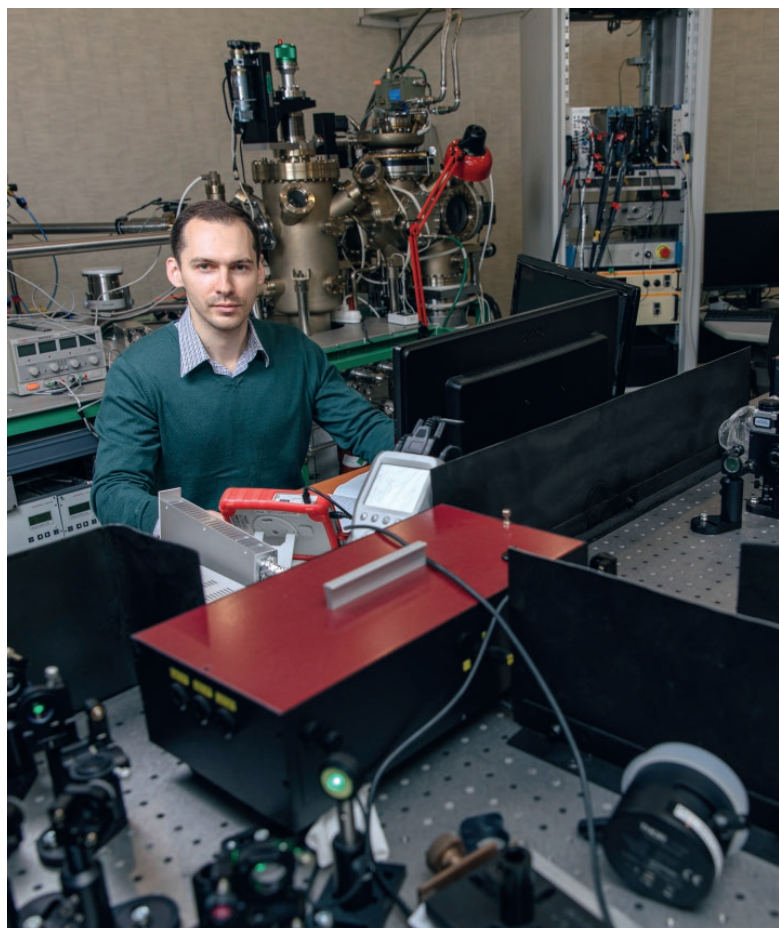
они находятся в Курчатовском институте. Первые два имеют импортное происхождение, а наш микроскоп самой последней по времени сборки 2015 г. разработан у нас. Когда мы поняли, что французский микроскоп 2003 г. уже не справляется со всеми задачами, запустили собственный проект по созданию установки. Сейчас мы ее эксплуатируем как нашу основную «рабочую лошадку». По своим техническим характеристикам наш микроскоп соответствует уровню современных передовых зарубежных аналогов, нисколько им не уступая.

— **Наверное, непростая была работа?**

— Работа была достаточно сложной. Сначала надо было спроектировать железную часть установки, потом программное обеспечение, потому что сам по себе аппарат без машинного управления ничем собой не представляет. Нужно понимание логики управления самой установкой и проведения исследования, то есть сбора так называемых сырых данных, а затем их переработки в атомные карты. Требуется также математический аппарат для анализа этих данных. В очень маленьком кусочке материала заложено очень большое количество атомов — их там многие миллиарды. Так вот, тот объем, который мы собираем в процессе исследования, — это несколько десятков миллионов атомов. Иначе говоря, наша томограмма, тот трехмерный объем, который мы исследуем, состоит из нескольких десятков миллионов точек, объектов. Это достаточно большой массив данных, который несет в себе информацию не только о расположении атомов, их координатах и трехмерном пространстве, но и об их химической природе, плюс еще техническую информацию, которая собирается с установки. Поэтому получается колоссальный многомерный массив, с которым требуется работать. А для этого нужны определенные алгоритмы и быстрые вычислительные машины. Поскольку история проектирования и сбора установки началась в достаточно сложных условиях, как финансовых, так и организационных, это стало небольшой «войной», но мы через нее прошли и сегодня имеем очень хороший результат. На текущий момент у нас есть инструмент, который позволяет нам проводить исследования на мировом уровне.

— **Что для вас удивительного, нового открыл наномир, который вы увидели? Что он собой представляет?**

— Я занимаюсь этой тематикой довольно давно, еще со студенческой скамьи, но для меня по сей день удивительно, как работает этот аппарат. Мы еще со школы имеем представление, что такое микроскопия, мы знаем также, что мир состоит из атомов — кубиков мироздания. Но наше сознание устроено так, что пока сам не увидишь, не поверишь. Наша установка позволяет буквально вручную разобрать материал по атомам. Для меня каждый раз это удивительно. Воспринимаю это как некую магию. Мы вроде бы понимаем, что материалы вокруг нас как-то образуются, формируются, создаются, но мы всегда работаем с какими-то макрообъектами. А здесь мы берем этот макрообъект и его маленькую частичку и делаем то, что называется «обратный инжиниринг», — это когда вы разбираете что-либо, пытаетесь понять, как оно устроено. Мы делаем обратный инжиниринг веществ, которые нас окружают, то есть фактически окружающего нас мира. Разве это не чудо?



Атомно-зондовый томограф ПАЗЛ-3D, разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» — ИТЭФ



Сергей Васильевич Рогожкин, доктор физико-математических наук, начальник отдела атомно-масштабных исследований материалов ядерной техники НИЦ «Курчатовский институт» — ИТЭФ:

— Наши атомно-зондовые томографы, на которых мы сегодня работаем, позволяют выявить в материалах то, что практически недоступно для других методов. Наши самые первые исследования были посвящены конструкционным материалам

— Ключевая задача, которой занимаемся я и мои коллеги, — разработка томографического микроскопа и развитие микроскопии как направления. Здесь используются передовые технологии с точки зрения как сбора и обработки информации, так и инженерии — условий, при которых происходит исследование материалов: это сверхвысокий вакуум — 10^{-10} торр, сверхнизкие температуры — ниже температуры кипения жидкого азота, сверхкороткие импульсы лазерного излучения — сотни фемтосекунд, в совокупности обеспечивающие атомарное разрешение и изотопную чувствительность на всем спектре периодической таблицы. Микроскоп позволяет приоткрыть завесу того, как устроен материал, как расположены в нем атомы, какие они, как выглядит их взаимное расположение.

Наша непосредственная цель — с одной стороны, повысить качество того, что этот подход может дать, то есть улучшить

реакторов. Уже тогда было показано, что радиационные изменения наноструктуры, которые возникают в этих материалах, критически важны с точки зрения деградации элементов реакторных установок. Двигаясь дальше, мы всякий раз находили что-то принципиально отличающееся от общепринятых взглядов и позволяющее нам предсказать, что будет с материалом при больших дозах нагрузок или больших временах эксплуатации. Все это подтверждалось в течение долгих лет.

Эти установки интересны не только для реакторного материаловедения, но и для многих других направлений. Это и наноэлектроника, и новые биоматериалы, полимерные материалы: ведь эта методика позволяет в атомных масштабах проанализировать, что собой представляет материал, а точнее — как он должен выглядеть на атомарном уровне, каким должен быть с точки зрения его свойств и как добиться такого результата. Мы занимаемся не только эксплуатацией таких установок, но и их разработкой. Сейчас мы создаем прототип установки следующего поколения, в ближайшее время она будет запущена. Таким образом, мы выйдем на создание промышленного прибора, который востребован в научных и материаловедческих организациях России, а также в ряде зарубежных стран, где таких установок мало или совсем нет.

алгоритмы обработки информации и внедрить передовые решения, методики в области сбора данных; с другой стороны, мы пытаемся расширить область применения, например, скрестив этот микроскоп с другим — сканирующим электронным микроскопом (СЭМ) с двухлучевой системой. В одном микроскопе — СЭМ — исследуется материал на больших масштабах, происходят выявление областей, интересных для исследования, и приготовление образцов, для чего используется, например, сфокусированный ионный пучок, а в соседней атомно-зондовой приставке осуществляется непосредственное детальное исследование интересующей области. Такая комбинация нужна для того, чтобы не вытаскивать образец на воздух, где неизбежно происходит окисление поверхности и, как следствие, насыщение азотом, водородом и водой. Наша задача — избежать этого и сделать приставку к СЭМ в виде атомно-зондового томографа, чтобы передача

образца происходила непосредственно из камеры предварительного исследования и пробоподготовки в камеру, где происходит само исследование.

Такая близость двух микроскопов дает еще и ряд других преимуществ. Например, какие-то повреждения или искажения, связанные с перемещениями образца, также будут минимизированы. Кроме того, нам открывается целый класс задач, когда, например, образец можно замораживать и переносить в замороженном виде. В мире есть работы, когда исследуются замороженные биологические материалы, что позволяет сократить как время, так и вероятность того, что при транспортировке образец будет поврежден или разморожен. Все это весьма перспективно и интересно.

Когда разрабатываешь новый прибор или его другую модификацию, это всегда шаг в неизвестность, открытие чего-то нового. Ты обнаруживаешь те или иные закономерности, которые вроде бы описаны в учебниках, но когда ты их реализуешь в приборе, они претерпевают существенные изменения. В результате простые формулы, известные с вузовской скамьи, как

Разработка новых приборов или их других модификаций, это всегда шаг в неизвестность, открытие чего-то нового. В процессе обнаруживаются те или иные закономерности, которые вроде бы описаны в учебниках, но при их реализации в приборе, они претерпевают существенные изменения



Андрей Аскольдович Алеев, научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» — ИТЭФ:

выясняется, не работают. Оказывается, мир значительно сложнее и интереснее, чем все то, что можно описать теоретически. Тут требуется эмпирико-теоретический подход — соединение двух направлений, часто противоречащих друг другу.

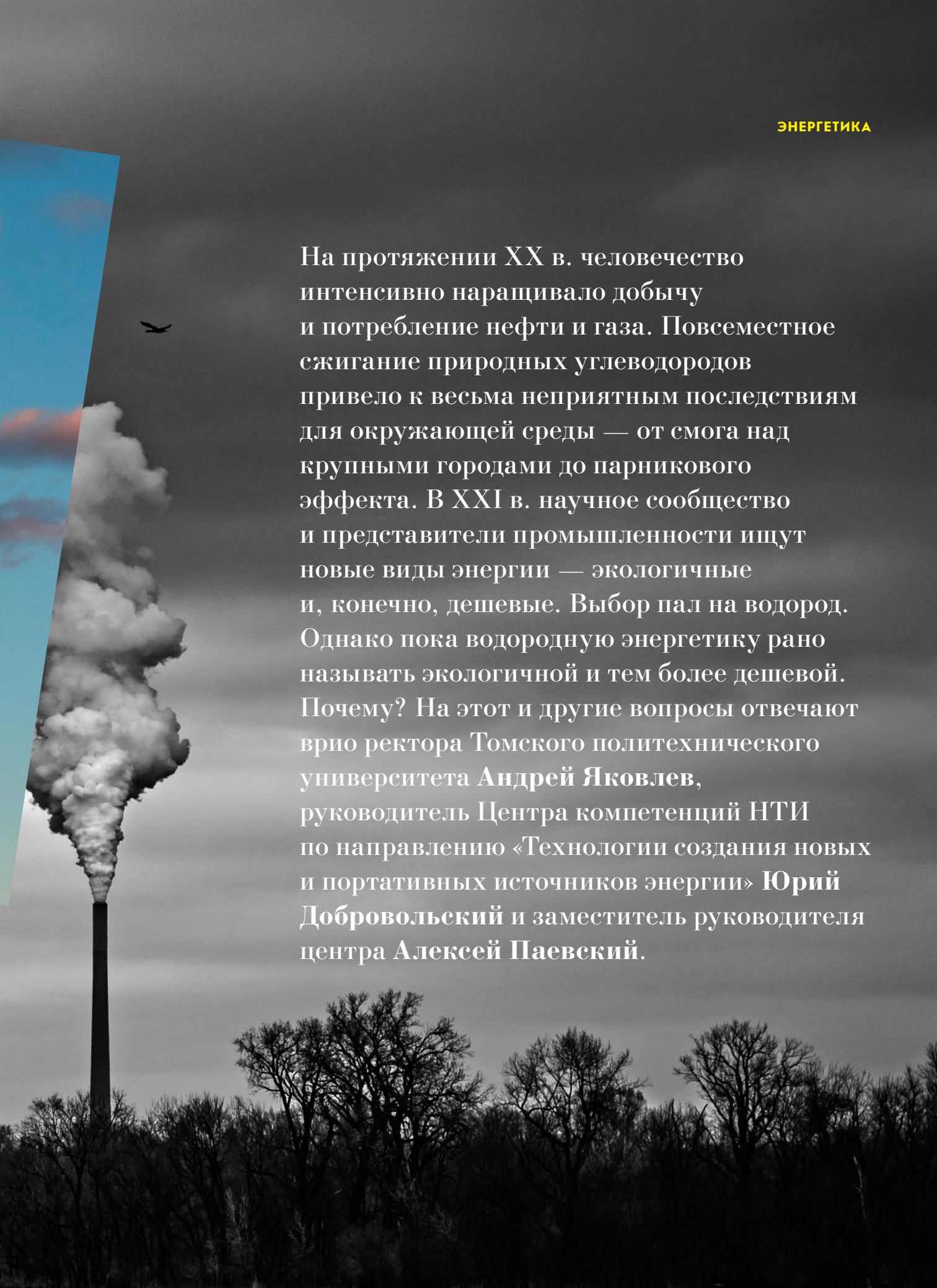
Одно из таких последних наших открытий связано с фемтосекундным лазером. Первоначально пучок его импульса составлял порядка 60 фс. Считалось, что это необходимое условие для того, чтобы исследование было эффективным. Но в какой-то момент мы поняли, что изменение длительности — скажем, не 60 фс, а 300 фс — ничего не меняет. Это значительно упростило подготовку и проведение самого исследования, увеличило надежность и уменьшило стоимость оборудования в части, связанной со сжатием лазерного импульса и его наведением.

Сейчас мы работаем над тем, чтобы проверить гипотезу, можно ли использовать не фемтосекундные, а пикосекундные лазеры. У них более длительный импульс лазерного излучения. Оборудование уже в монтаже. Вполне возможно, что это сработает, и если да, то мы в разы упростим сам процесс исследования, а также существенно удешевим установку, значительно повысив ее компактность. Хотелось бы сделать что-то более миниатюрное, что можно если не в карман положить, то уж точно поставить на лабораторный стол. ■

Беседовала Наталья Лескова

ВОДОРОДНАЯ АЛЬТЕРНАТИВА





На протяжении XX в. человечество интенсивно наращивало добычу и потребление нефти и газа. Повсеместное сжигание природных углеводородов привело к весьма неприятным последствиям для окружающей среды — от смога над крупными городами до парникового эффекта. В XXI в. научное сообщество и представители промышленности ищут новые виды энергии — экологичные и, конечно, дешевые. Выбор пал на водород. Однако пока водородную энергетику рано называть экологичной и тем более дешевой. Почему? На этот и другие вопросы отвечают врио ректора Томского политехнического университета **Андрей Яковлев**, руководитель Центра компетенций НТИ по направлению «Технологии создания новых и портативных источников энергии» **Юрий Добровольский** и заместитель руководителя центра **Алексей Паевский**.



Андрей Александрович Яковлев,
доктор физико-математических наук, временно исполняющий обязанности ректора ТПУ:

— На водород как энергоноситель для будущей энергетики делают ставку во многих странах. Почему именно водород принято считать альтернативой другим видам энергии?

— Водород имеет шансы заменить высокоуглеродные в плане выбросов источники энергии — нефть и уголь, — но только в аспекте топлива. С точки зрения энергетики у водорода действительно формируется своя ниша. При этом важно понимать, что водорода в чистом виде в природе не существует. Большая часть водорода на Земле встречается в молекулярных соединениях, таких как вода или органические вещества. Его невозможно добыть, а значит, на производство водорода тратится энергия. Но одновременно с этой нишей, безусловно, есть. И, как мне кажется, она будет только расширяться.

Прежде всего, водород может использоваться как аккумулятор. Сегодня у всех на слуху ветряная, атомная энергия, энергия Солнца. Например, солнечные батареи естественным образом получают энергию только в дневное время суток. Чтобы создать накопительный эффект ночью, отличной подойдут водородные технологии.

Помимо этого водород может использоваться в ряде узкоспециальных задач, где сформированы жесткие требования к соблюдению экологической безопасности, которые с каждым годом ужесточаются.

Мир сейчас возлагает большие надежды на водородные технологии как на один из мощных толчков для роста экономики, в том числе ее энергетического сектора. Это направление активно разрабатывают развитые страны. Например, в Германии принята государственная энергетическая

политика, где водород играет важную роль. Подобные программы и проекты созданы и в других странах Европы, в Японии, в США. Поэтому и в России этому направлению стали уделять серьезное внимание.

— Когда человечество сможет перейти на такой вид энергии? Существуют ли прогнозы?

— Здесь достаточно вспомнить стационарные телефоны и переход к пейджерам. Затем их вытеснили мобильные телефоны, а потом и смартфоны и «умная» техника. Каждый раз при переходе от одной технологии к другой, принципиально новой, временной промежуток сужался. Если взглянуть на то, с какой скоростью сегодня возникают и внедряются новые технологии, как резко снижается их стоимость и расширяется сфера применения, то, конечно, сроки внедрения сокращаются экспоненциально. Поэтому если произойдет технологический рывок, который приведет к снижению стоимости получения, транспортировки, хранения и использования водородных технологий, то они сразу войдут в нашу жизнь.

Надо сказать, что водород уже неоднократно использовался и ранее. Практически любой двигатель внутреннего сгорания без всяких переделок может работать на водороде. Впервые водородное топливо применили для обычных двигателей внутреннего сгорания в сентябре 1941 г. в блокадном Ленинграде. Буквально за десять дней 200 грузовиков перевели с бензина на водород, что позволило в условиях нехватки обычного топлива защитить город. В СССР также существовал самолет, летающий на водородном топливе. Сегодня вы можете купить автомобиль, например *Toyota*,

с двигателем на водороде. Но все упирается в стоимость производства, транспортировки и хранения водорода.

Существуют разные оценки массового производства и использования. Кто-то считает, что «водородный переворот» в экономике случится уже к 2030 г., другие уверены, что к 2035 г. Но вновь подчеркну: этот переворот будет стремительным.

— Чего не хватает на данном этапе?

— На мой взгляд, не хватает понимания полной бизнес-цепочки. Когда мы говорим об изменении экономики, необходимо точно знать, как эта технология будет встроена в существующую бизнес-модель. Только после этого возможно планомерное объединение различных организаций для решения поставленной задачи. Задел по многим направлениям есть. Сейчас важно осознать, какова предельная стоимость этой технологии, какие требования к безопасности необходимо сформировать и какое место в экономике займет это направление. То есть нужна некая общая цель. Как мне кажется, эта цель и породит новые фронтальные направления как в научно-исследовательской повестке, так и в инженерном секторе.

— В каких сферах в России существует тот задел, о котором вы говорили?

— Развитие водородных технологий — масштабная задача. Среди основных областей — получение водорода. Здесь существует несколько направлений: «зеленый» водород, получаемый из воды, «серый» — из угля, «синий» — из газа.

Другая область связана с транспортировкой. Она может осуществляться по газосборочным сетям, в растворах, в твердом виде. И, конечно, важный вопрос использования водородных технологий. В каждой из сфер в России, как мне кажется, задел серьезный.

Например, в Томском политехническом университете с помощью плазменно-химических технологий специалисты могут разлагать метан на водород и углерод. Кроме того, здесь сформировались компетенции, связанные с хранением и использованием водорода. Речь идет о твердооксидных элементах и полимерах.

У коллег из Российской академии наук есть собственные серьезные наработки по этой тематике. Мы активно взаимодействуем с разными научными институтами по всей стране. Если нам удастся объединиться, создать полигоны для отработки водородных технологий, собрать

разрозненные сферы в единое направление для решения общей задачи, то у нас появится большой шанс на успех и мы сможем занять лидирующие позиции в мировом пространстве.

— Какие преимущества у водородных технологий?

— Если обратиться к зарубежному стратегическому видению развития общества, например к европейскому, то станет ясно, что на первый план выходит экологичность. И это самая важная характеристика: при окислении водорода остается только вода. Вторая важная составляющая связана с экономикой. Водородные технологии могут обеспечивать энергией отдаленные населенные и малонаселенные районы.

Помимо этого, водородные технологии могут стать буфером для обеспечения пиковых нагрузок в дневное или ночное время, когда по тем или иным причинам простаивают солнечные или ветряные станции.

Нельзя забывать, что современные беспилотные летательные аппараты также работают на водородном топливе, поскольку топливные элементы на водороде более эффективны. К тому же они безопасны и не имеют явного теплового следа.

Таким образом, у водородных технологий существуют разнообразные преимущества в каждой из областей, где они применяются. Они занимают собственные ниши и в целом призваны решать глобальные задачи, связанные с климатическими изменениями, а также хранением и накоплением энергии.

— В нашей стране экономика завязана на использовании нефти и газа. На каком этапе развития альтернативы в виде водородных технологий мы находимся? Догоняем или опережаем зарубежные страны?

— В настоящее время происходит определение стратегического вектора использования водородной энергетики. Только когда мы определим направление развития этих технологий, мы начнем либо догонять, либо идти на опережение.

Если смотреть с точки зрения научно-го развития, то в каких-то направлениях мы конкурируем с зарубежными учеными, где-то мы на шаг впереди, а в некоторых сферах занимаем догоняющую позицию. Но это во многом зависит от области исследования.

— Водородные технологии — не новость. Их использовали и раньше. Почему к ним вновь возвращаются именно сейчас?

— Здесь действительно наблюдается волнообразная кривая интереса к водородной энергетике. Например, в Томском политехе еще десять лет назад существовало направление, которое выпускало специалистов для водородной энергетике. Благодаря этому в вузе сформировались высокие компетенции по данной тематике.

Сегодня, на мой взгляд, экономика и общество имеют возможность использовать водород. Вопрос лишь в стоимости.

Это правда, технологии существовали и раньше. И мы хорошо осознаем их преимущества. Уже сейчас они используются в разных отраслях промышленности. Но все упирается в итоговую ценность. Если ценность использования этих технологий будет превышать ценность другого типа продукта, они сразу его заместят.

В настоящее время распространена точка зрения, что мы подошли к этому очень близко. Тот, кто в момент икс окажется на шаг впереди, получит наибольшее преимущество.

— ТПУ входит в топ-25 вузов мира по уровню цитирования научных публикаций на тему водорода. В каких направлениях вуз наиболее силен?

— Водород, конечно, охватывает множество разных аспектов. Томский политех работает в нескольких направлениях и занимает лидирующие позиции в некоторых из них. Одно из значимых направлений связано с хранением водорода. У нас реализована и усовершенствована технология производства «синего» водорода, нам удалось решить задачи НИОКР, которые многим еще не поддались. И, разумеется, мы уделяем внимание разработкам в области использования водорода.

Эта работа ведется совместно с промышленными партнерами, например с компанией «Газпром». Сейчас мы готовим образец для проведения опытно-промышленных работ.

— Стоит ли ожидать, что Томский политехнический университет станет «водородной долиной»?

— Мы стремимся к этому. Чтобы решить такую важную задачу, нужны сильные консорциумы. Необходимо создавать полигоны, площадки в рамках долины, где этот консорциум смог бы реализовать свой потенциал в этом направлении.

Идея создания «водородной долины» правильная. Мы сейчас прорабатываем необходимые документы, чтобы в будущем создать площадку, о которой все университеты

России, институты РАН, компании, так или иначе связанные с водородными технологиями, знали бы, что есть такое место, где сосредоточены последние наработки и знания. Подобная долина может стать фронтиром для будущих прорывных исследований, что коренным образом повлияет на новую формирующуюся экономику. Мы плотно работаем в этом направлении.

— К тому же и прецеденты есть. Так, в МГУ создается технологическая долина, нацеленная на разработку и внедрение востребованных бизнесом технологий, а также удержание и привлечение высококвалифицированных специалистов.

— Да, верно. МГУ, РХТУ и другие ведущие университеты работают над созданием научно-технологических центров притяжения. И это правильный вектор развития. Любой крупный промышленный игрок будет четко знать, куда ему обратиться, чтобы получить доступ к самым актуальным технологиям.

— Как будет реализовано сотрудничество с академическим Институтом проблем химической физики? Насколько я знаю, там учрежден Центр компетенций Национальной технологической инициативы (НТИ) по направлению «Технологии создания новых и портативных источников энергии».

— Институт проблем химической физики РАН — одна из ведущих организаций в развитии водородных технологий. Мы активно прорабатываем аспекты сотрудничества и надеемся, что в ближайшее время сможем подписать соответствующий договор.

Ключевой вопрос в выстраивании любых коллабораций посвящен ускорению структурирования знаний. Необходимо создать такой формат сотрудничества, чтобы знания, которые рождаются в результате совместной деятельности, как можно быстрее доходили до производства и приносили прибыль.

Очевидно, что без Российской академии наук ни один университет не справится с серьезными научными задачами. И в случае с водородными технологиями для российской науки это новая сфера деятельности, в том числе новая экономика, которая естественным образом потребует нового поколения исследователей. Поэтому только вместе с РАН и промышленными партнерами мы сможем создавать новые образовательные программы, чтобы обеспечить ту самую бизнес-цепочку, о которой я говорил в начале.

Когда в рамках созданного консорциума есть определенная задача, происходит объединение усилий, а не распределение ответственности. Участники консорциума делятся друг с другом полномочиями, понимая свою ответственность друг перед другом для решения поставленной задачи.

Основной принцип работы ТПУ — открытость. Без открытости, без проговаривания того, куда движется университет, не получится собрать хороший консорциум для решения серьезных задач. Поэтому мы нацелены на сотрудничество, на работу с РАН, с университетами нашей страны, на открытость при взаимодействии с промышленными партнерами, в том числе в области развития водородных технологий.

— Какие промышленные партнеры могут участвовать в этой цепочке для развития водородных технологий в России?

— Два ключевых партнера уже определены. Они также выделены правительством России, а Минэнерго активно работает в этом направлении. Речь идет о крупнейших корпорациях: «Газпром» и «Росатом». Это два российских флагмана, которые занимаются данной проблематикой.

Реализуя наши собственные амбиции, мы получим совершенно новый сектор экономики с промышленными предприятиями и большим количеством рабочих мест.

— Будут ли созданы в ТПУ новые образовательные программы для решения кадрового вопроса?

— Мы сейчас формируем стратегию развития университета. Конечно, мы намерены готовиться к тому, что именно наши специалисты будут работать в этом новом секторе экономики.

— Какая область применения водородных технологий, на ваш взгляд, особенно актуальна сегодня?

— Как мне кажется, наиболее приоритетным направлением можно считать развитие распределенной энергосети. Повторюсь, что все заместить невозможно. Такой цели нет. Ясно, что водородные технологии важны и с экономической точки зрения, и с экологической. Поэтому мы сфокусируем внимание на создании всей бизнес-цепочки, то есть будем работать в продуктовой логике. Вся наша деятельность должна в итоге давать конечный результат — готовый продукт. Но говорить о продукте преждевременно без понимания потребностей

нашего будущего клиента. Поэтому клиентов сейчас несколько. Потенциальных продуктов тоже несколько. Поле нашего зрения на данный момент широкое. И, конечно, мы не забываем о европейских коллегах. Широкий фронт позволяет нам не упускать трансформации этой сферы. Здесь всегда нужно держать руку на пульсе. Мы тщательно изучаем мировой опыт в области водородных технологий и прорабатываем взаимодействие с международными консорциумами.



Юрий Анатольевич Добровольский,
доктор химических наук, руководитель Центра компетенций Национальной технологической инициативы по направлению «Технологии создания новых и портативных источников энергии» на базе Института проблем химической физики РАН (Черноголовка):

— Насколько активно развиваются водородные технологии в нашей стране?

— Речь идет не столько о водородных технологиях, сколько о технологиях водородной экономики и энергетики. С точки зрения науки эта область развита достаточно хорошо. Сегодня во многих странах мира она стала применяться на практике, и это постепенно поддерживается и на законодательном, и на политическом уровне. Я рад, что Россия сейчас тоже активно обращает внимание на водородные технологии. Самое главное — то, что в этой сфере у нас наработаны хорошие компетенции. Есть ряд научных групп, занимающихся исследованиями на мировом уровне, и даже созданы отечественные технологии.

— Как это соотносится с тем, что Россия — сырьевая держава?

— Конечно, главный доход страны пока основан на добыче нефти и газа. Однако сегодня буквально на наших глазах появляются программы по водородной энергетике в странах Европы. Так, в Германии уже разработана Национальная водородная стратегия, в рамках реализации которой Германия активно ищет сотрудничества, в том числе с Россией. И это вполне оправданно.

Россия действительно может выступать поставщиком экологически чистых водородных продуктов, например для той же Германии. Вся инфраструктура для этого есть. Дешевое углеводородное топливо будет заменено более инновационным — водородным, а наша страна продолжит экспорт, но в рамках технологического передела.

— Почему именно сейчас весь мир обратил внимание на водородные технологии?

— Сегодня во всех странах мира люди все больше осознают ответственность за свои поступки. И здесь речь, конечно, идет об экологии и изменении климата. Я не сторонник теории антропогенного влияния на климатические изменения, однако поддерживаю все шаги человечества в сторону улучшения экологической ситуации и сохранения окружающей среды. В комплексе все экологические инициативы улучшают качество жизни человека.

Например, Евросоюз все чаще заявляет о том, что страны Европы не будут использовать технологии, загрязняющие окружающую среду и атмосферу, в том числе углекислым газом. Активно обсуждается вопрос о том, что промышленные выбросы углекислого газа будут облагаться дополнительным налогом. Возможно, из-за этого даже природный газ, использованный в чистом виде, будет стоить в разы дороже, чем водород, произведенный из него же.

Россия, как и другие страны, давно освоила технологии переработки природного газа в водород. Надо сказать, что водород — достаточно распространенное вещество в промышленности. Практически все азотные удобрения в мире произведены из водорода, который получен на основе углеводородов.

Основной и самый дешевый процесс получения водорода — конверсия водородного сырья (как правило, это метан) с водой. Однако полученный водород нельзя назвать

экологически чистым, ведь при его синтезе выделяется все тот же углекислый газ. Поэтому главная задача современности — попытаться сделать этот процесс «зеленым». Сегодня такие возможности уже есть.

Например, во всем мире, в том числе и в нашей стране ученые работают над технологией получения водорода, при которой углекислый газ связывается с другими химическими соединениями, образуя пластик, азотные удобрения и другие структуры. Дальнейшая проработка этой технологии позволит впоследствии синтезировать водород в больших масштабах.

Другая технология связана с атомной энергетикой. «Росатом», например, активно развивает способы накопления избытка мощности своих станций в виде водорода.

Помимо этого, водородные технологии неразрывно связаны с возобновляемыми источниками энергии. Звучит, на первый взгляд, неубедительно. Но здесь достаточно вспомнить, что весомая часть энергетики в России приходится на гидроэнергетику, а это самый что ни на есть возобновляемый источник энергии. Мощности некоторых электростанций попросту не используются, хотя они могут стать основной для производства водорода методом электролиза.

— В каких направлениях вы будете работать с Томским политехническим университетом?

— Мы попытаемся объединить наши усилия и наработки в области производства водорода, в которой и в нашем институте, и в Томском политехе накоплен большой опыт. У нас есть шанс сформировать всю технологическую цепочку в одной кооперации и довести полученный продукт до производителей.

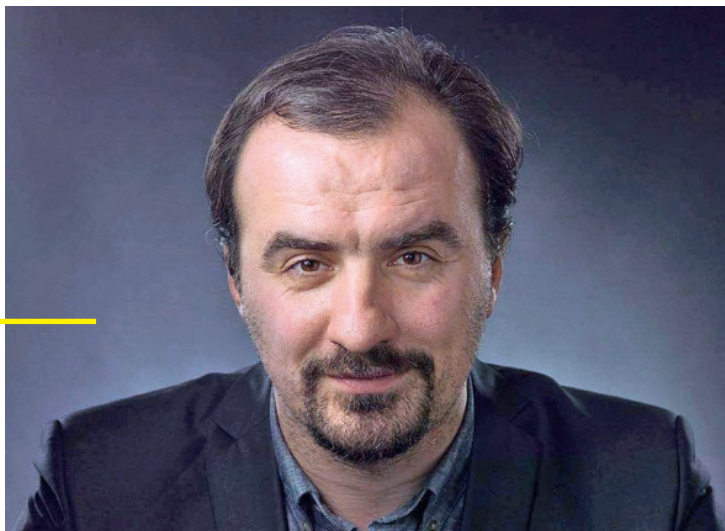
Помимо этого, у ТПУ есть ряд компетенций по производству твердооксидных топливных элементов. Такие элементы могут работать при высоких температурах, но использовать не чистый водород, а, например, пропан. Разработаны также технологии твердополимерных топливных элементов, которые функционируют при низких температурах, очень быстро запускаются, но требуют более чистого водорода. То есть речь идет о разных сферах применения в рамках одного консорциума.

Отдельно нужно сказать про обучение. Одна из наших целей — подготовить специалистов в области разработки и производства источников энергии, которые пока представлены слабо. За два года в рамках

Центра компетенции НТИ мы создали четыре образовательные программы в ведущих вузах страны.

Кооперация, которая возникает между нами, — хороший пример того, как технологии, применяющиеся в различных областях, при совместном использовании могут дать фантастический результат. Мы на это очень надеемся.

Алексей Сергеевич Паевский, заместитель руководителя Центра компетенций НТИ по направлению «Технологии создания новых и портативных источников энергии» на базе ИПХФ РАН:



— Насколько сегодня развиты водородные технологии в России?

— Водород в России производится в достаточно большом объеме. Но это нельзя назвать собственно водородными технологиями. Почти весь этот газ в нашей стране синтезируется на крупных химических предприятиях и используется прямо на месте для производства аммиака и азотных удобрений.

В России водородных технологий пока очень мало. Однако научное сообщество всерьез заинтересовалось этим направлением. В советское время в нескольких научных центрах создавали водородные топливные элементы, основанные на электрохимической реакции окисления водорода. В первую очередь подобные элементы применялись в космической отрасли. Знаменитый многоразовый космолан «Буран» летал с использованием водородных топливных элементов, как и ряд спутников. Ведь именно эти топливные элементы позволяют накапливать больше энергии на единицу массы, чем любые аккумуляторы.

— Какие разработки в области водородных технологий развивает ваш центр НТИ?

— Центр был создан для того, чтобы развивать сквозные технологии, востребованные на всех или на многих рынках НТИ. В нашем случае речь идет об энергетических установках для летательных аппаратов, автомобильного и морского транспорта, источниках питания для мобильных устройств, а также устройствах для накопления и хранения энергии. В контексте водородных технологий специалисты центра создают и разрабатывают опытные образцы водородных топливных элементов

и технологии их применения. В дальнейшем эти элементы будут использоваться по-разному. Это могут быть источники электрической энергии для регионов Крайнего Севера, топливные элементы для современных видов транспорта.

Так, например, Центром компетенций НТИ совместно с компанией «ИнЭнерджи» был разработан электрический самолет грузоподъемностью в 200–250 кг с основным двигателем на водородно-воздушном топливном элементе.

Другое важное направление связано с так называемыми удлинителями пробега для электромобилей. Современный электромобиль может проехать до 100 км на одном заряде. После этого его необходимо зарядить с помощью либо быстрой зарядки за один час, либо стандартной электросети за восемь часов. Для перемещения по городу этого вполне достаточно. Но для разездов между городами использовать электромобиль вы не сможете. Из Москвы во Владимир, например, электромобиль вас уже не довезет.

Поэтому совместно с участниками консорциума — компаниями «ИнЭнерджи» и «Электротранспортные технологии» — на базе экспериментальной машины *Lada El Lada* мы создали удлинитель пробега, который к существующим 100 км литий-ионных аккумуляторов добавляет еще 300–400 км. Кроме того, среди наших разработок — интеллектуальная роботическая грузовая платформа на топливных элементах, которую можно использовать на складах, аэродромах, в шахтах. ■

Беседовала Анастасия Пензина

АНТРОПОЛОГИЯ

Выживут только дружелюбные

Естественный отбор наиболее дружелюбных и общительных особей позволил человеку разумному одержать верх над неандертальцами и прочими видами людей и покорить планету

Ванесса Вудз и Брайан Хэар



ОБ АВТОРАХ

Ванесса Вудз (Vanessa Woods) — научный сотрудник Дюкского университета и директор образовательной программы *Puppy Kindergarten*.

Брайан Хэар (Brian Hare) — профессор эволюционной антропологии, психологии и нейробиологии Дюкского университета. В этом году у Вудз и Хэара вышла новая книга, одноименная предлагаемой статье: *Survival of the Friendliest* («Выживание наиболее дружелюбных»).



В настоящее время мы — единственные представители рода *Homo* на Земле, но еще сравнительно недавно дело обстояло совсем иначе. Примерно за 300 тыс. лет своего существования человек разумный (*Homo sapiens*) делил планету по меньшей мере с еще четырьмя видами людей. Сегодня нам кажется вполне очевидным, почему в борьбе за существование верх одержал именно человек разумный: из всех наших собратьев мы оказались самыми смыслеными, находчивыми и изобретательными.

Но так мы привыкли думать о себе сами. В действительности же некоторые другие виды людей отличались большей технологической продвинутостью, гораздо более длительным (миллион лет) сроком существования на Земле и даже более крупным головным мозгом, чем *Homo sapiens*. Если бы мы перенеслись на 100 тыс. лет назад и решили предсказать, какой из видов людей одержит победу в гонке за существование, скорее всего предпочтение было бы отдано неандертальцу.

С неандертальцами нас роднит общий предок. Эти люди были сильнее нас, обладали бочкообразной грудью и хорошо развитой мускулатурой. Они мастерски владели оружием и охотились на всех крупных млекопитающих ледникового периода. В их геноме даже присутствовал вариант гена *FOXP2*, который,

по мнению ученых, ответствен за тонкую моторику языка, губ и гортани, необходимую для связной речи. Высокого развития достигала и культура неандертальцев: они хоронили умерших собратьев, заботились о больных и раненых товарищах, раскрашивали свои тела различными пигментами и носили украшения из раковин, перьев и костей.

Первые *H. sapiens*, оказавшиеся в Европе, столкнулись с довольно крупной популяцией неандертальцев, хорошо приспособленных к здешнему холодному климату. Позднее, по мере наступления ледников, современные люди спасались от них бегством, а неандертальцы оставались на своих насиженных местах и как ни в чем не бывало продолжали существовать. Современные люди по сравнению со своими ближайшими нынешними

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Почему из всех обитавших на Земле видов людей сохранился только *Homo sapiens*? Ведь у неандертальцев, живших на Земле сотни тысяч лет назад, шансы на выживание были гораздо выше.
- Человек разумный пережил всех сородичей, потому что прошел естественный отбор на дружелюбие и в результате обрел способность к эффективной групповой деятельности.
- Эта способность и сложная социальная жизнь породили такие технологии и культурные традиции, благодаря которым современные люди и покорили планету.

От волка к собаке

Отбор на дружелюбие управлял и ходом эволюции, в результате которой кроважидный дикий зверь превратился в любимого домашнего питомца

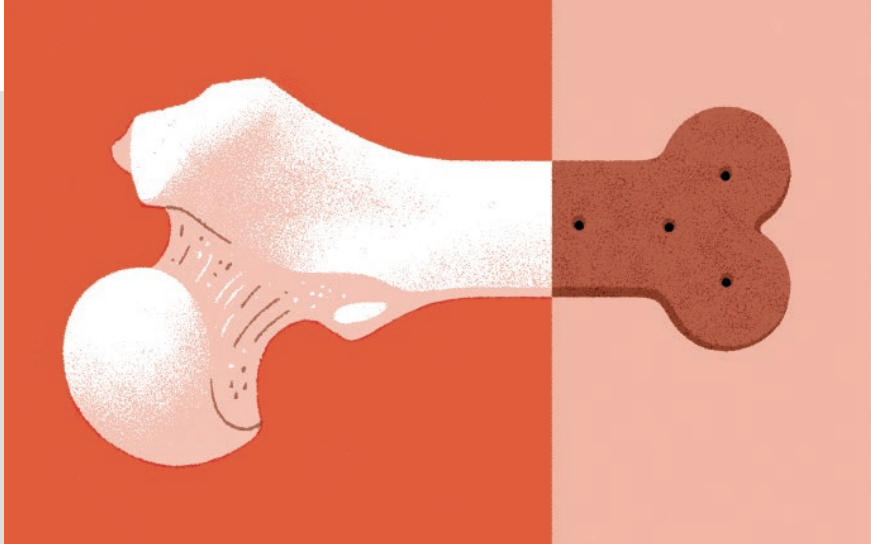
Люди — не единственные существа, прошедшие самоодомашнивание. То же самое совершили наши ближайшие родичи, карликовые шимпанзе (бонобо), и звери, которых мы сегодня считаем своими лучшими друзьями. Лишь крошечная часть генома отличает собак от волков, но на планете сегодня обитает более миллиарда собак, а волки уже многие годы балансируют на грани вымирания. Да, собаки порой мешают нам спать громким лаем и лакают воду из унитазов, но кроме этого они защищают наших близких и имущество, отыскивают наркотики, распознают рак, успокаивают детей с аутизмом, дарят нам бескорыстную любовь и по несколько раз в день вытаскивают нас на улицу, заставляя дышать свежим воздухом.

Приступив почти 20 лет назад к этому исследованию, наша группа ученых обнаружила, что собаки, помимо прочего, обладают еще и недюжинным интеллектом: наши жесты они понимали лучше, чем какие-либо иные животные, включая шимпанзе и бонобо. Волки — гораздо более загадочные и непредсказуемые существа. Их родная стихия — дикая природа, а таких уголков на Земле остается все меньше.

Между тем еще сравнительно недавно исход эволюционной борьбы между собаками и волками было очень трудно предсказать. Вопреки расхожему мнению, собаки произошли не от волков: и те и другие возникли от некоего общего волкообразного предка, получившего название волка ледникового периода. Этот зверь достиг поистине выдающегося эволюционного успеха: он пережил всех прочих крупных хищников (саблезубых кошек, пещерных львов и гигантских гиен) и расселился по большей части Северного полушария.

Согласно народным преданиям, люди приносили маленьких волчат в свои поселения, приручали их и превращали в домашних животных. Или, как в 1974 г. писал признанный знаток волков Дэвид Мич (David Mech), «очевидно, древние люди приручали волков, одомашнивали их и в конце концов с помощью целенаправленного скрещивания вывели домашнюю собаку (*Canis familiaris*)».

Но эти сценарии не выдерживают критики. Приручение животного осуществляется на протяжении его жизни, а одомашнивание происходит в результате искусственного отбора животных на протяжении многих поколений и сопровождается изменением их генома. И это всего лишь одно из различий между приручением и одомашниванием животных. Даже современные волки едят



слишком много мяса (до 10 кг за одну кормежку!), чтобы служить людям надежными охотничьими партнерами. А ведь волки ледникового периода были намного крупнее современных. Во времена одомашнивания собаки люди занимались охотой и собирательством и каждый день были вынуждены отправляться на добычу пищи, оставляя детей в поселении, — ни один здравомыслящий человек не бросил бы своих отпрысков в компании с такими огромными и свирепыми хищниками.

У собак морда короче, а клыки меньше, чем у волков. Их шерсть имеет различную окраску, хвост иногда закручен кольцом, а уши свисают вниз. И в отличие от волков, приносящих один выводок щенков в год, собаки могут размножаться круглогодично.

Все перечисленные и многие другие особенности собак — результат одомашнивания. Никто, однако, не знал, откуда взялись эти признаки и связаны ли они друг с другом, — до тех пор пока советский генетик Дмитрий Беляев не занялся выведением одомашненных лисиц на нескольких сибирских зверофермах.

Свои опыты ученый начал в 1959 г., руководствуясь единственной целью: вывести лисиц, не боящихся людей. Через несколько десятков поколений были получены дружелюбные зверьки, вилявшие хвостом при виде людей, охотно запрыгивавшие к ним на колени и от радости облизывавшие им лицо.

Когда наша исследовательская группа начала изучать таких лисиц, мы обнаружили, что, подобно собакам, они отлично читали намерения ученых по их жестам. Все без исключения зверьки не боялись людей и испытывали к ним привязанность. Но некоторые другие признаки (например, высокий уровень социального интеллекта) возникали лишь эпизодически.

Вернемся теперь к волкам и собакам и перенесемся в ледниковый период, когда наши древние предки начали вести более оседлый образ жизни. В результате, вероятно, они стали производить больше пищевых отходов, которые были вынуждены выбрасывать за границы своих поселений. Вполне возможно, что эти объедки привлекали голодных

волков, но кормились ими только самые дружелюбные звери: за проявление малейшего признака агрессии по отношению к людям они тут же были уничтожены.

По-видимому, сытые дружелюбные волки получали некоторые репродуктивные преимущества и часто скрещивались друг с другом, поскольку вместе кормились в одних и тех же местах. Через множество поколений «отбора на дружелюбие», происходившего без какого-либо вмешательства людей, у таких «особых» волков могли изменяться и некоторые внешние признаки (окраска шерсти, форма хвоста и ушей и т.д.). Люди мало-помалу привыкали к волкам-мурсыкам и начинали относиться к ним более терпимо. А вскоре они обнаружили, что эти звери обладают поистине уникальной среди животных способностью — понимать их жесты и слова.

Звери, умевшие реагировать на человеческие голоса и жесты, оказались отличными охотничьими партнерами и охранниками. А вскоре наши предки, вероятно, полюбили их и за дружелюбие и верность и постепенно начали пускать в свои дома. Люди не одомашнивали волков и не создавали собак. Собаками стали наиболее дружелюбные к людям волки, которые одомашнили себя сами.

В промежутке между 14 тыс. и 40 тыс. лет назад, когда протекал этот процесс, дикие волки, вероятно, превосходили численностью собак — в конце концов, в голодные годы люди, вероятно, даже использовали собак в качестве дополнительного источника пищи. А первое упоминание об охоте на волков относится к VI в. до н.э., когда афинский политик Солон предлагал за каждого убитого волка щедрое вознаграждение.

С тех пор началось массовое уничтожение волков, которое через многие столетия едва не стерло этих зверей с лица земли. По оценкам ученых, в 2003 г. мировая популяция серых волков насчитывала около 300 тыс. зверей. А численность собак на планете в 2013 г. превышала 1 млрд животных. История волка и домашней собаки — наглядный пример того, каким образом дружелюбие может обернуться победоносной эволюционной стратегией.

родственниками-приматами — шимпанзе и бонобо — обладают довольно невысокой генетической изменчивостью, а это значит, что в процессе эволюции мы по меньшей мере несколько раз сталкивались с так называемым эффектом бутылочного горлышка (критического сокращения численности популяции) и почти оказывались на грани вымирания.

Но если человек разумный не был самым сильным и умным человеческим существом, как же ему удалось одержать верх над более достойными конкурентами?

Самоодомашнивание людей

Похоже, *H. sapiens* был самым дружелюбным существом из всех видов людей, обязанным своим эволюционным успехом особому рода радушию и способности к плодотворному общению, которое социологи называют кооперативной коммуникацией. Представители нашего рода отлично работают совместно с другими людьми, даже с незнакомцами. Обсуждая общую цель, мы способны общаться и находить общий язык с соплеменниками, которых прежде никогда не видели в глаза, а затем работать с ними бок о бок ради ее достижения. Такая способность по-прежнему у малышей еще до того, как они начинают ходить или разговаривать, а потому ее можно рассматривать как своего рода врата в сложный социальный и культурный мир современных взрослых людей. Эта способность позволяет нам проникать в мысли других людей и наследовать знания, накапливаемые людьми из поколения в поколение. И, наконец, она составляет основу всех форм культуры и образования, включая освоение сложнейших средств речевого общения.

Дружелюбие и радушие усилились у людей в результате «самоодомашнивания». Одомашнивание животных — это процесс, предполагающий интенсивный отбор человеком наиболее дружелюбных особей. В процессе одомашнивания животное не только становится более дружелюбным, но и претерпевает множество других изменений, которые, на первый взгляд, совершенно не связаны между собой. Под влиянием одомашнивания могут измениться форма морды животного, размеры зубов, пигментация различных частей тела или волос (шерсти), а также характер репродуктивных циклов и деятельность гормональной и нервной систем. Говоря об одомашнивании, мы обычно имеем в виду искусственный отбор (селекцию)

и животных. Одомашнивание, однако, может протекать и под влиянием естественного отбора — в этом случае происходит самоодомашнивание.

В течение последних 20 лет мы активно разрабатываем гипотезу самоодомашнивания людей совместно с антропологом из Гарвардского университета Ричардом Рэнгэмом (Richard Wrangham) и психологом из Дюкского университета Майклом Томаселло (Michael Tomasello). В ходе наших исследований мы установили, что, помимо прочего, самоодомашнивание привело к усилению ключевого фактора эволюционного успеха современных людей — их способности к кооперативному общению с другими. Наша гипотеза предполагает, что если *H. sapiens* претерпел самоодомашнивание, то должны существовать свидетельства об отборе людей на дружелюбие, датируемые плейстоценом (2,6 млн — 11,7 тыс. лет назад). К сожалению, поведение не подвергается окаменению, но регулирующие его нейрогормоны влияют на строение нашего скелета и все происходящие с ним изменения можно проследить по палеоантропологическим образцам.

Самоодомашнивание людей — научная гипотеза, предполагающая, что *Homo sapiens*, судя по изменениям поведения и физических признаков наших древних предков, прошел эволюционный отбор на дружелюбие и радушие

Например, чем больше тестостерона вырабатывается в организме в период полового созревания, тем массивнее будут надбровные дуги у человека и тем длиннее будет его лицо. Для мужчин обычно характерны более массивные, сильно выступающие надбровные дуги и слегка более удлиненное лицо, чем у женщин, — такие черты лица мы называем маскулинными. Тестостерон напрямую не вызывает у человека агрессию, но его уровень в крови и взаимодействие с другими гормонами способны модулировать агрессивное поведение.

Антропологи уже давно заметили, что за время палеолита надбровные дуги у людей стали менее массивными, лица укоротились, а головы немного уменьшились в размерах. Как показали наши собственные исследования,

в результате документации и последующего анализа этих изменений можно определить время, когда происходили те или иные физиологические сдвиги, формировавшие поведение и анатомию древних людей.

В совместной работе с двумя учеными из Дюкского университета — Стивеном Черчиллом (Steven Churchill) и Робертом Сиери (Robert Cieri) — мы обнаружили, что до временной отметки в 80 тыс. лет назад (средний плейстоцен) у представителей *H. sapiens* лица были длиннее, а надбровные дуги гораздо массивнее, чем в позднем плейстоцене. В среднем у черепов возрастом менее 80 тыс. лет надбровные дуги выступали над поверхностью лба примерно на 40% меньше, чем у черепов большего возраста. Кроме того, эти черепа были на 10% короче и на 5% уже, чем более древние черепа. Хотя детали такой закономерности варьировали, прослеживалась четкая общая тенденция: лица современных охотников-собирателей и земледельцев постепенно приобретали все более утонченные черты, что свидетельствовало о снижении у них выработки тестостерона. Вполне возможно, что другой нейрорегулятор, серотонин, одновременно способствовал возникновению ряда изменений, которые в конце концов привели к уменьшению размеров головного мозга и снижению агрессивности людей. Увеличение выработки серотонина отмечается на ранней стадии одомашнивания, а потому этот гормон также мог участвовать в формировании черепа.

Как показывают социальные и поведенческие эксперименты, лекарственные препараты, повышающие доступность серотонина в головном мозге (такие, например, как селективные ингибиторы обратного захвата серотонина, СИОЗС), делают людей более расположенными к сотрудничеству и менее склонными причинять вред другим. Серотонин не просто меняет поведение людей и животных. Если этот гормон воздействует на организм на ранних стадиях развития, он, похоже, изменяет морфологию черепа. Беременные мыши, получавшие СИОЗС, производили на свет детенышей с более короткими и узкими мордами и черепами.

Для всех видов людей, кроме *H. sapiens*, были характерны низкий скошенный лоб и толстокостный череп. Голова неандертальцев походила по форме на мяч для игры в регби. Лишь у человека разумного череп приобрел округлую (шаровидную) форму. Такая форма головы указывает на возможное повышение доступности серотонина во время нашего эволюционного развития. Судя по ископаемым останкам, форма черепа у человека разумного

начала меняться после того, как он отделился от общего предка с неандертальцами, — и это изменение, по-видимому, продолжалось вплоть до сравнительно недавнего эволюционного прошлого. Как показывают результаты совместного исследования Черчилла, Сиери и одного из авторов этой статьи (Брайана Хэара), наш череп, а значит и наш головной мозг, за последние 20 тыс. лет продолжали уменьшаться в размерах.

Не исключено, что в результате самоодомашнивания у *H. sapiens* могла измениться и выработка еще одного гормона — окситоцина. Падение уровня тестостерона и повышение уровня серотонина усиливают влияние этого «гормона любви» на социальные взаимодействия. Окситоцин принимает важное участие в процессе родов и облегчает выработку грудного молока; с молоком он передается от матери ребенку. Зрительный контакт между родителями и их малышами стимулирует выработку окситоцина, что заставляет и тех и других испытывать друг к другу еще более сильную любовь, нежность и привязанность. Когда психолог из Лейденского университета Карстен де Дре (Carsten de Dreu) и другие исследователи предлагали испытуемым в своих опытах вдыхать окситоцин, люди становились более дружелюбными, внимательными друг к другу и доверчивыми в финансовых и социальных экспериментальных играх.

Все эти изменения оказали сильное и продолжительное влияние на социальные отношения людей. Мы считаем, что они, по сути дела, даже породили новую социальную категорию — «внутригруппового чужака». Наши эволюционные кузены, обыкновенные и карликовые шимпанзе (бонобо), распознают «своих» и «чужих», основываясь исключительно на факте знакомства с ними. Сородич, живущий вместе с ними на их территории, признается членом группы. Все остальные шимпанзе — чужаки. Единственный четкий критерий здесь — узнавание. Любой сородич — либо знакомый, либо чужак.

Шимпанзе могут эпизодически слышать или видеть своих сородичей-соседей, но при этом их взаимодействия почти всегда имеют кратковременный и враждебный характер; напротив, бонобо относятся к незнакомцам и чужакам более дружелюбно. Мы реагируем на незнакомых людей по-разному, но в отличие от животных нам свойственна способность мгновенно определять, принадлежит ли чужак к нашей собственной социальной группе. Только люди способны распознавать группы сородичей на основании внешнего облика их представителей, языка или убеждений. Наши постоянно меняющиеся представления о групповом

статусе позволяют нам тут же идентифицировать себе подобных — даже в том случае, если мы никогда не встречались с ними прежде.

Изо дня в день, даже не отдавая себе в этом отчета, мы украшаем себя разнообразными вещами, облегчающими взаимную идентификацию, — особыми предметами одежды, значками, религиозными символами и т.д. Способность к распознаванию себе подобных занимает важнейшее место в жизни современных людей и вдохновляет нас на совершение больших и малых добрых поступков — от помощи старикам в переходе через улицу до донорства органов неизвестным людям.

Немеркнущий свет

Несмотря на то что в далекой древности, примерно 80 тыс. лет назад, неандерталец, похоже, имел некоторые преимущества перед человеком разумным, мало-помалу начали появляться очевидные признаки того, что *H. sapiens* не только одержит верх в конкурентной борьбе со своим кузеном, но и в конце концов станет безраздельным властелином планеты.

В археологических находках из Африки, датируемых временем возникновения человека разумного как вида (примерно 300 тыс. лет назад), имеются явные указания на то, что древние люди владели прогрессивными технологиями и обладали сложной социальной жизнью. Однако такие свидетельства напоминали мерцающие огоньки: признаки технического прогресса то появлялись, то надолго исчезали вновь. После 80 тыс. лет назад эти огоньки уже не угасали и разгорались все ярче. Изучение ископаемого материала показывает, что примерно в это время сложные культурные традиции и технологии начали быстро и широко распространяться по миру. Расширение социальных сетей сопровождалось быстрым обменом культурными инновациями. По сути дела, человечество переживало культурную и технологическую революцию.

Около 50 тыс. лет назад первобытные люди начали оставлять материальные свидетельства социального и культурного развития в местах своего проживания по всему миру. За сотни миль от морских берегов ученые находили ювелирные изделия из раковин, а это значит, что предмет, совершенно бесполезный в практическом отношении, люди считали достаточно ценным для того, чтобы переносить его на значительное расстояние. Рисуя животных на скалах, наши доисторические предки

старались передать не только эффект движения, но и трехмерность пространства и изображаемых объектов.

Мысль о том, что человек обязан своим эволюционным успехом дружелюбию и радушию, далеко не нова. Как не нова и мысль о том, что в процессе эволюции люди стали умнее. В своих исследованиях мы обнаружили связь между этими двумя фактами: именно усиление социальной толерантности вызвало у людей когнитивные сдвиги, связанные с кооперативной коммуникацией.

По всей видимости, «самоодомашнивание» людей привело как к росту их численности, так и к технологической революции, свидетельства которой присутствуют в ископаемой летописи. Дружелюбие способствовало усилению связей между группами инноваторов, чего никогда не могло бы произойти у людей других видов. Самоодомашнивание наделило наших предков сверхспособностями и позволило им в мгновение эволюционного ока покорить мир. А все другие виды людей навсегда исчезли с лица планеты.

Мысль о том, что человек обязан своим эволюционным успехом дружелюбию и радушию, далеко не нова. Как не нова и мысль о том, что в процессе эволюции люди стали умнее

Между тем столь оптимистический взгляд на природу человека разумного плохо согласуется с многочисленными примерами тех страданий и горестей, которые до сих пор причиняют друг другу люди. Самоодомашнивание прекрасно объясняет все хорошее и доброе в людях, но как его увязать с присутствующим в них злом? Как оно может примирить нашу доброту с нашей жестокостью?

Некоторые из нейрорегуляторных изменений, лежащих в основе дружелюбия, ответственны и за ужасающую человеческую жестокость. Окситоцин, играющий, по-видимому, ключевую роль в развитии родительского поведения, получил название «гормон любви и объятий». Но, пожалуй, куда лучше ему подошло бы название «гормон медведицы». Ведь именно окситоцин, который начинает интенсивно вырабатываться в организме матери после рождения малыша, порождает в ней ярость и гнев

по отношению к любому существу, представляющему малейшую угрозу ее отпрыску. Так, самки хомяков с детенышами, получавшие дополнительное количество окситоцина, чаще атаковали и кусали самцов, демонстрировавших угрозу. Кроме того, окситоцин принимает участие и в возникновении некоторых форм мужской агрессии. Когда самец крысы ухаживает за самкой, уровень окситоцина у него повышается. В результате он становится более нежным и заботливым по отношению к подруге, но одновременно и более агрессивным по отношению к представляющим для нее угрозу незнакомым самцам. Такая связь между социальной близостью, окситоцином и агрессией распространена в мире млекопитающих очень широко.

По мере того как самоодомашнивание формировало современных людей, они становились все более дружелюбными, но одновременно осваивали и новые формы агрессии. Высокая доступность серотонина во время развития головного мозга усиливала влияние окситоцина на наше поведение. Члены различных социальных групп легко налаживали друг с другом тесные и прочные отношения, благодаря чему ощущали себя единой семьей. Но в то же самое время люди становились и более жестокими, что позволяло им яростнее защищать своих близких от врагов.

Любовь — контактный вид спорта

Несмотря на всю парадоксальность человеческой природы, порожденную эволюцией, наше восприятие сородичей, относящихся к нашим или чужим социальным группам, отличается большой гибкостью. Люди уже не раз продемонстрировали высокую способность расширять свои представления о размерах социальных групп до масштабов в тысячи и миллионы особей.

Можно привести и другие примеры. Лучший способ улаживания конфликта между группами — ослабить возникающее при этом у людей чувство угрозы с помощью социальных взаимодействий. Если чувство угрозы вызывает у нас острое желание защитить других членов своей группы от опасности, то мирные контакты между группами способствуют расширению у людей понимания о том, кто входит в состав их социальных групп.

Белые дети, обучающиеся в 1960-х гг. в школах вместе с чернокожими сверстниками, в зрелом возрасте чаще вступали в межрасовые браки, чаще обзаводились чернокожими друзьями и приветливее относились к своим чернокожим соседям.

Эта формула системы образования остается актуальной и в наши дни. Студенты

Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, проживавшие в комнатах общежитий с соседями иной расовой принадлежности, впоследствии более благорасположенно относились к межрасовому общению и смешанным бракам. Социологи установили, что одна лишь фантазия о налаживании положительного контакта с представителем такой маргинальной группы людей, как бездомные, помогает «благополучным» людям сформировать к ним сочувственное отношение. А дружба между людьми, относящимися к различным социальным группам, и вовсе помогает им быстрее налаживать дружеские отношения с представителями любых «чужих» групп.

Гипотеза самоодомашнивания объясняет, почему эволюция современных людей как вида ориентировала нас на сотрудничество с себе подобными. Установление контактов между людьми разных национальностей, идеологий или культур — универсальное и эффективное напоминание о том, что все мы принадлежим к одной и той же группе, называемой *H. sapiens*.

Самоодомашнивание дало нашему виду преимущества, позволившие ему пережить всех других представителей рода *Homo*. В эволюционном плане дружелюбие предполагало возникновение позитивных форм поведения — намеренного или непреднамеренного — по отношению к другим. А это означает не только расширение представлений о границах социальных групп, но и развитие способности быстро понимать намерения и помыслы других людей. Преимущества социальных взаимодействий (то есть способности более эффективно решать проблемы сообща, чем поодиночке) во многом определили эволюционный успех нашего вида и даже оказали большое влияние на формирование естественным отбором наших тела и разума. Появившаяся в результате способность делиться знаниями и передавать их из поколения в поколение породила такие технологические и культурные парадигмы, которые в конце концов и позволили людям стать хозяевами планеты. ■

Перевод: А.В. Щеглов

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Стикс Г. Наша изюминка // ВМН, № 11, 2014.
- The Genius of Dogs: How Dogs Are Smarter Than You Think. Brian Hare and Vanessa Woods. Dutton, 2013.
- Survival of the Friendliest: Homo sapiens Evolved via Selection for Prosociality. Brian Hare in Annual Review of Psychology, Vol. 68, pages 155–186; January 2017.

Эвкалиптовые деревья стремительно растут в провинции Квазулу-Натал, Южно-Африканская Республика. Такие плантации дают быстрый прирост древесины, но сдерживают биоразнообразие.



УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

ПРОБЛЕМА БИОМАССЫ

Стратегии по сокращению углекислого газа предполагают большее количество деревьев, травянистой растительности и остатков сельскохозяйственных культур, чем можно сохранить на нашей планете

Деннис Гэррити и Эрик Тоенсмейер

ОБ АВТОРАХ

Деннис Гэррити (Dennis Garrity) — председатель Глобального альянса EverGreening; работал старшим научным сотрудником во Всемирном центре агролесомелиорации и в Институте мировых ресурсов, а также возглавлял международную программу охраны земельных ресурсов *Landcare International*.

Эрик Тоенсмейер (Eric Toensmeier) — преподаватель Йельского университета, старший научный сотрудник проекта *Drawdown* и Глобального альянса EverGreening; автор книги «Решение проблем двуокси углерода в сельском хозяйстве: мировой опыт выращивания многолетних культур и восстановительного земледелия для смягчения последствий изменения климата и обеспечения продовольственной безопасности» (*The Carbon Farming Solution: A Global Toolkit of Perennial Crops and Agric Regenerative Agriculture Practices for Climate Change Mitigation and Food Security*, 2016).



По ровным просторам сельскохозяйственных угодий в пригороде Декейтера, штат Иллинойс, полный початков кукурузы самосвал едет на склад, расположенный на одном из концов завода по производству этанола, которым управляет гигантская аграрно-сырьевая корпорация *Archer-Daniels-Midland*. Кукуруза отправляется в большой бродильный чан, где превращается в этанол, который будет доставлен на нефтеперерабатывающий завод, затем смешан с бензином и поступит в продажу по всей стране. В процессе ферментации выделяется углекислый газ, который затягивается в большую газоотводную трубу и направляется по трубопроводу в устье скважины. Насосы закачивают газ глубоко под землю, где он удерживается в песчаниках.

Этот пилотный проект завершает трехлетнее испытание нового способа извлечения диоксида углерода из атмосферы, попутно обеспечивающего получение конкурентоспособного рыночного продукта, достаточного для оплаты счетов. Углекислый газ поглощается зерновыми растениями во время их роста; закачка газа в песчаник позволяет хранить его долго.

Надо сказать, что использование зерна в качестве топлива, ускорившееся в США в 2000-х гг., представляется спорным. Зерно может идти как в пищу людям, так и на корм скоту; выращивание же растений для

получения биотоплива занимает земельные ресурсы, которые иначе могли бы использоваться под сельскохозяйственные культуры. Сжигание этанола в автомобилях приводит к новым выбросам CO_2 , как это происходит при уборке и транспортировке зерна. Для ферментации, транспортировки по трубам и закачки газа требуется электроэнергия, которую, по крайней мере на Среднем Западе, можно получить из ископаемого топлива. Однако неясно, может ли этанол, полученный из кукурузы, дать даже небольшое технически значимое снижение содержания CO_2 в атмосфере.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Дорожные карты по ограничению глобального потепления до $1,5^\circ C$ слишком сильно полагаются на роль деревьев и других растений в удалении CO_2 из атмосферы.
- Основной стратегией служит биоэнергетика с улавливанием и хранением диоксида углерода, но для полноценной разработки потребовался бы участок земли величиной с континент, в настоящее время эта земля используется для выращивания сельхозкультур и выпаса скота.
- Биомасса может сыграть отдельную значимую роль, если увеличение повторного использования материалов и рост числа экологически чистых кухонных плит снизят спрос, а некоторые методы агролесомелиорации повысят предложение.



Кофейные малорослые деревья и кустарники, культивируемые в горных районах Эквадорских Анд, хорошо устроились под деревьями, дающими благотворную тень, а также удобряющими почву опавшими листьями

Завод в Декейтере — один из примеров комплекса процессов, известных как «биоэнергетика с улавливанием и хранением диоксида углерода» (BECCS). Хотя на данном производстве используется кукуруза, большинство технологий предназначены для переработки древесных растений: это и деревья, и кустарники, и злаки, которые превращаются в жидкое топливо или сжигаются в целях выработки электроэнергии. Выбросы от данных видов деятельности могут быть изолированы под землей или собраны и проданы в качестве сырья — главным образом химическим заводам или для закачки в трудноизвлекаемые нефтяные залежи, чтобы вытеснить больше нефти.

В настоящее время биомассе, по большей части игнорируемой десятилетие назад, отводится важная роль в проектах по смягчению последствий изменения климата. Список прикладных технологий в этой области длинный и растет каждый день; в дополнение к биотопливу в него включены сжигание биомассы для производства электроэнергии

и тепла, биогазовые установки, в которых получают применимый в хозяйстве метан, биоуголь, идущий на удобрение почв, а также теплоизоляционные, строительные материалы и биопластики. Дорожные карты, которые построены исходя из применения биомассы как энергетического сырья, включают доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) 2018 г. о глобальном потеплении на 1,5° C и специальный доклад 2019 г. об изменении климата и земельных ресурсов; Национальную оценку климата (U.S. National Climate Assessment), проведенную в США и выпущенную в ноябре 2018 г., а также сценарии проекта *Drawdown*, представленные в его обзоре 2020 г. Мощные отрасли, такие как электроэнергетика, топливная промышленность и производство пластмасс, обещают большие ставки биомассе в качестве сырьевой базы, при этом прогнозируемый спрос завышается до небес.

Общее согласие научного сообщества по поводу дорожных карт сводится к тому, что в целях сохранения климата, подходящего для

цивилизованного мира, глобальное потепление не должно превышать доиндустриального уровня более чем на $1,5^{\circ}\text{C}$. Это положение предусматривает 45-процентное сокращение выбросов к 2030 г. и нулевые нетто-выбросы к 2050 г. в сравнении с уровнями 2010 г., согласно докладу МГЭИК об удержании повышения температуры в пределах $1,5^{\circ}\text{C}$. Остаточный углеродный бюджет человечества — количество будущих выбросов, которое можно допустить, не превышая $1,5^{\circ}\text{C}$, — составляет 420–580 млрд т. Проживание в этих пределах требует резкого снижения эмиссии, а также удаления CO_2 из атмосферы. По оценкам МГЭИК, благодаря BECCS можно секвестрировать от 0,4 млрд до 11,3 млрд т CO_2 в год.

Проект *Drawdown* не включает в себя BECCS, но рассчитан на удаление в среднем от 1,1 до 2,5 млрд т в год с учетом других способов превращения биомассы в энергетическое сырье.

Только для крупномасштабного внедрения биоэнергетики с улавливанием CO_2 потребовалось бы от 300 млн га земли, что примерно равно площади Индии, до 700 млн га, что соизмеримо с площадью континента Австралия

Проблема состоит в том, что в большинство планов входит неумеренное потребление биомассы. А правда заключается в том, что земля, необходимая для производства всей этой биомассы, представляет собой серьезное ограничение. МГЭИК сообщает, что для крупномасштабного внедрения только BECCS потребуется от 300 до 700 млн га земли, что примерно укладывается в площадь Индии (328 млн га) или Австралии (769 млн га). Однако большая часть земли, подходящей для BECCS, используется сегодня под сельское хозяйство.

Производство биомассы в целях BECCS в заданном масштабе, не говоря уже о других видах применения, может привести к серьезному конфликту с сельскохозяйственным назначением земель по обеспечению производства продовольственных культур и выпасов, необходимых в животноводстве. Леса также могут подвергнуться нарушению, поскольку планы предусматривают их вырубку для

получения биомассы и замену на монокультурные плантации из высокопродуктивных эвкалиптов или сосен — крупных и единственно культивируемых на данном месте пород, губящих биоразнообразие.

Возможно, что умеренное потребление биомассы для изъятия двуокиси углерода может быть эффективным. Несколько методов даже улучшают урожайность сельскохозяйственных культур, а также производительность древесных растений. Но прогнозируемый спрос чрезвычайно высок, а BECCS — это слон, не приметить которого сложно. По данным Всемирного института улавливания и хранения углерода, МГЭИК и другие организации поместили почти все яйца в одну корзину, делая столь серьезную ставку на BECCS, хотя в мире существует всего около пяти небольших демонстрационных проектов BECCS. Надо признать, что это рискованная стратегия по смягчению последствий изменения климата.

Значительно возросший спрос на биомассу еще более обострит уже начавшуюся серьезную борьбу за то, как земля будет использоваться в будущем. Растет напряженность в спорах, следует ли отдавать больше земли под сою на корм крупного рогатого скота, дабы удовлетворить растущий спрос на мясо, либо необходимо использовать пахотные земли под производство биотоплива на смену ископаемого топлива — и как можно сохранить леса, избежав вырубки. Использование безграничного числа вариантов на планете невозможно, ибо существуют внутренние ограничения. Началась глобальная схватка за овладение биомассой, и если не произойдут существенные изменения в намерениях, правительства и промышленные отрасли придут в столкновение.

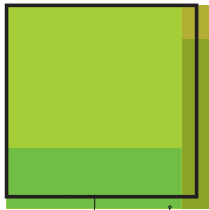
Грядущая борьба

Наши биологические виды всегда были рассчитаны на получение биомассы, чтобы удовлетворить основные потребности человека, и практически никто не задумывался, сколько мы на самом деле используем. Древесные растения уже давно предназначались для изготовления инструментов, строительства жилых домов, зданий, кораблей, выработки ковров и ковриков, бумаги и картона. Бамбук имеет более 1,5 тыс. зарегистрированных способов применения. С самых ранних дней биомасса буквально обеспечивала топливом наши печи. Более 3 млрд человек ежедневно используют для приготовления еды дрова.

В середине 1800-х гг. общество стало переходить от применения древесины к ископаемому топливу для получения энергии,

2015 г.

Общий объем производства биомассы 3,154 млрд т

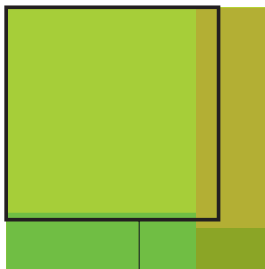


Совокупный спрос 2,749 млрд т
Превышение — 405 млрд т

- Выращивание деревьев, бамбука и травянистых растений на лесных вырубках
- Растительные остатки
- Леса, предназначенные под заготовку древесины
- Кустарники, обогащающие пахотные земли

2050 г. без применения BECCS

Прогнозируемое производство 5,150 млрд т



Прогнозируемый спрос на традиционное использование биомассы 3,386 млрд т

Превышая возможности производства биомассы

Первостепенные планы по ограничению изменения климата во всем мире основаны на использовании биомассы в качестве сырья для топлива, выработки электричества, тепла, производства химических веществ и различных материалов. В 2015 г. предложение биомассы соответствовало спросу с небольшим избытком. В 2050 г. увеличение экологически чистого производства, а также меры по сдерживанию спроса (особенно рост переработки макулатуры и внедрение экологически чистых кухонных плит) сместят предполагаемый спрос в сторону новых видов применения биомассы, таких как производство целлюлозного биотоплива и биопластика, но только если биоэнергетика с улавливанием и хранением углерода (BECCS) не будет включена. Однако отметим, что планы сильно зависят от BECCS. Производство в 2050 г. сможет поддержать низкий уровень применения BECCS, но будет значительно отставать в случае требуемого высокого уровня.

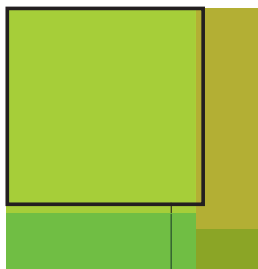
Увеличение переработки макулатуры

Экологически чистые кухонные плиты

Новое сокращение спроса: 2,38 млрд т

Спрос на новые ресурсы: 1,945 млрд т

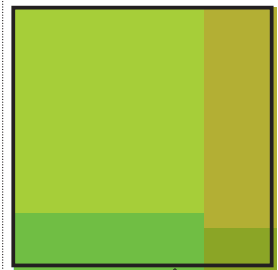
- Биопластик
- Биоуголь
- Районная теплосеть
- Биогаз



Уравновешенный спрос 2,949 млрд т

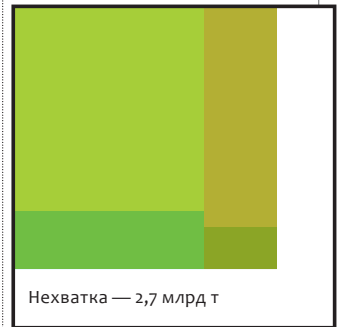
2050 г. с участием BECCS

Низкий уровень потребностей в BECCS (2,1 млрд т добавлено, всего 5,05 млрд т)



Превышение — 100 млн т

Высокий уровень потребностей в BECCS (4,9 млрд т дополнительно, всего 7,85 млрд т)



Нехватка — 2,7 млрд т

разных веществ и химических соединений. Эта зависимость лежит в основе нынешнего процветания цивилизованного мира, но она также поставила нас на грань климатической катастрофы.

Большая часть биомассы, заготавливаемой сегодня, более правильно называемая лигноцеллюлозной биомассой, получается из деревьев, бамбука, травянистых растений и растительных остатков, таких как, например, кукурузные стебли. Биомасса стала привлекательным решением проблем изменения климата, потому что она в некоторой степени возобновляема — ее можно выращивать снова и снова.

BECCS прописана во всех планах как главный источник энергетического сырья, получаемого из биомассы. Однако это еще по большей части умозрительный процесс:

улавливание выбросов CO₂ здесь идет теми же методами, что и отделение газа на электростанциях, работающих на ископаемом топливе. Самая большая проблема — объем биомассы, который может понадобиться. В своем отчете о 1,5° С МГЭИК заявляет, что все подходы к ограничению глобального потепления до 1,5° С или 2,0° С требуют удаления из атмосферы порядка 100–1000 млрд т двуокиси углерода в течение XXI в. Удаление подразумевает обновление лесов, а методы ведения сельского хозяйства, как ожидается, могут помочь улавливать углерод в почвах и многолетних растениях, но в схеме МГЭИК в качестве основного инструмента сохранения глобального баланса углерода используется BECCS. Надо отметить, что перепрофилирование 300–700 млн га пахотных земель для производства биомассы



Бамбуковый лес готов обеспечить биомассой многие виды использования; бамбуковая роща в Арасияме (Киото, Япония) поддерживается как туристическая достопримечательность

просто несовместимо с растущими потребностями в продовольствии.

Если производство продуктов питания не подлежит обсуждению, то изыскать значительные земельные ресурсы весьма затруднительно. Некоторые ранее заброшенные пахотные земли могли бы быть возвращены в производство энергетических культур, способных расти на этой малопродуктивной почве, но пастухи и животноводы уже пасут скот на значительной части этой территории, так как основная ее часть и есть пастбища. Между тем для нас вырубка лесов под посадки биомассы как энергетического сырья, как утверждает в крупных климатических планах, нежелательна, но неизбежна, ибо если глобальные вредные выбросы не будут быстро сокращаться, то это поражение до старта. Леса — важные поглотители углерода; сведение лесов уже отвечает за 9% антропогенных выбросов. Чтобы сократить эмиссию двуоксида углерода и сохранить биологическое разнообразие, леса должны быть защищены и расширены, а не разрушены.

Прогнозы в проекте *Drawdown* в какой-то степени уникальны в том смысле, что в них учитываются только новые источники предложения, которые не подрывают продовольственную безопасность или повышают защиту и восстановление лесов.

Подходы к удержанию температуры в рамках повышения до 1,5° C без участия *BECCS* все еще требуют нереального количества биомассы. Безграничный аппетит к жидкому биотопливу в мире также неприемлем; просто не хватает пахотных земель для получения сырья, чтобы заменить огромное количество топлива, которое мы используем. Если бы 100% всей кукурузы, выращиваемой в США, было ферментировано в этанол, было бы удовлетворено лишь 25% потребности страны в бензине и дизельном топливе, при этом не осталось бы кукурузы людям или животным.

Чтобы увидеть, какой уровень развертывания *BECCS* может выбить мировое производство биомассы и запасы продовольствия на территорию нежизнеспособности,

мы проанализировали использование общего количества биомассы во всем мире на все цели в 2015 г., а затем прогнозируемый спрос до 2050 г., включая как низкие, так и высокие уровни выполнения BECCS, как предусмотрено в основных докладах. В обоих сценариях увеличение предложения само по себе не может удовлетворить спрос и позволить избежать сведения лесов. Сокращение спроса отдельно не может обеспечить производства биомассы существующими возможностями планеты. Только путем последовательного сокращения определенных потребностей при одновременном энергичном увеличении определенных форм предложения можно было бы обеспечить необходимую биомассу в случае умеренной зависимости от BECCS. Для выполнения сценария с высоким уровнем BECCS потребовалось бы 450 млн га земли, что больше площади Европейского союза.

Даже скромные планы применения BECCS провоцируют серьезные социальные проблемы. Большая часть необходимой земли в настоящее время обрабатывается мелкими землевладельцами, используется под пастбища скотоводами или покрыта лесом, где живут коренные народы, у которых против их воли могут быть отобраны земли их обитания. В последние годы около 12 млн человек во всем мире уже стали жертвами таких захватов земли. В Юго-Восточной Азии и Бразилии были конфискованы земли под расширение производства пальмового масла, а в некоторых частях Африки — для выращивания таких плантационных культур, как какао.

Снизить потребности

Уменьшая спрос на биомассу при выполнении некоторых стратегий рационального снабжения, можно сократить выбросы CO_2 , не оказывая воздействия на производство продовольствия или лесопользование. Первый шаг в этом направлении — снижение потребления. Во всем мире переработка макулатуры уже сокращает спрос на древесное сырье из лесов и насаждений на 484 млн т в год. По прогнозу проекта *Drawdown*, к 2050 г. объем повторной переработки увеличится примерно до 1100 млн т в год. В проекте также даны расчеты, утверждающие, что замена традиционных деревянных кухонных плит многообразными экологически чистыми может снизить потребление древесины к 2050 г. на 1700 млн т. Уменьшая домашний дым, эти плиты помогут также сохранить здоровье, что дает им важное преимущество.

Некоторые биологические отходы, которые в настоящее время выбрасываются как мусор, вместо этого могут стать сырьем для выработки энергии, в частности отходы деревообработки и благоустройства жилых территорий. Остатки культур после уборки урожая, такие как, например, кукурузные стебли и початки, также могут послужить дополнительным сырьем во избежание изменений в землепользовании. Правда, некоторые из них уже оприходованы: около четверти в настоящее время используется на корм скоту или идет на расширение фермерских практик. А еще 50% лучше всего оставить на полях для разложения вещества и восстановления почвы. Таким образом, остается только четверть ежегодных остатков для использования в виде нового сырья.

Все вместе эти меры могут существенно сократить потребность в биомассе. Но они едва ли высвободят достаточно биомассы, чтобы обуздать изменение климата.

Увеличить производство

Второй шаг к обеспечению устойчивого предложения биомассы состоит в производстве больших ее объемов на прежних площадях. Пожалуй, самый распространенный метод — расширение массивов прибыльных древесных насаждений: огромных рощ из эвкалиптов, сосен и других видов. На этих лесопосадках получают гораздо больше древесины с гектара, чем в естественных лесах. Однако засаживая большие участки земли одним видом деревьев, можно подорвать биоразнообразие, снизить качество воды и препятствовать смягчению последствий наводнений. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, во всем мире около 294 млн га уже используются под лесонасаждения. Добавление к этой площади будет затруднено, потому что земельные ресурсы не безграничны.

Естественные леса содержат огромные запасы диоксида углерода в древесине и почвах, поэтому важна их усиленная охрана. Надо отметить, что леса также подвержены пожарам и не весь удаленный из атмосферы углекислый газ постоянно удерживается запертым; мертвые, разлагающиеся деревья возвращают часть его в воздух.

Некоторые новые методы производства энергетического сырья из биомассы применяются во все более широких масштабах. Один из них касается получения целлюлозного этанола, когда определенные виды травянистых растений и стебли пищевых культур превращаются в жидкое топливо. Ученые достигли прогресса в поисках эффективных

способов разрушения волокнистого материала. Фермеры засаживают обширные площади многолетними травами, идущими на сжигание, такими как мискантус и просо прутьевидное, надеясь на развитие топливных рынков. Другая стратегия, называемая коротким оборотом рубки, включает посадку быстрорастущих деревьев, таких как ивы и тополя, чрезвычайно плотными рядами. Древесину заготавливают каждые два-три года с помощью тяжелой машинной техники, рубящей биопroduкцию прямо на месте. Общая площадь посадок этих систем, составляющая около 200 тыс. га, в соответствии с данными проекта *Drawdown*, все еще невелика, но, согласно прогнозам, эта отрасль значительно расширится.

Точное земледелие смогло бы помочь фермерам выращивать многолетние травы, накапливающие диоксид углерода на малопродуктивных землях их полей, а собранный урожай мог бы отправляться на биоперерабатывающие заводы, производящие топливо или электроэнергию

Перемены к лучшему

Существуют способы значительно увеличить поглощение CO_2 без изъятия сельскохозяйственных земель из цикла пищевого производства, причем некоторые из них действительно могут повысить урожайность культур. Один из самых распространенных методов — агролесоводство, когда деревья и кустарники высаживаются на посевных площадях и пастбищах. Во Франции строевые деревья и озимые зерновые растут на одной и той же земле, не конкурируя между собой, потому что деревья покрываются листвой летом, а пшеница вызревает к зиме. Фермеры могут выращивать на 100 га земель то, что требовало бы от 130 до 140 га, если бы древесные и зерновые виды выращивались отдельно.

Древесные растения также можно выращивать на пастбищах. Особенно многообещающий подход — лесопастбищный, быстро

распространяющийся в Латинской Америке. Кусты высаживают в плотные ряды, где домашние животные кормятся съедобными листьями, а ряды быстрорастущих деревьев, таких как эвкалипты, расположены далеко друг от друга, оставляя пространство для плодородных пастбищ. Интенсивно используемая лесопастбищная система может увеличить продуктивность скота вдвое или более, в то же время удерживая большое количество диоксида углерода.

Еще один подход, известный как «вечнозеленая энергетика», позволяет мелким хозяйствам в тропиках производить пищу и древесину для получения энергии на одном и том же земельном участке. Фермеры сажают на полях бобовые культуры, такие как глирицидия (*Gliricidia sepium*). Густая листва кустов служит удобрением почве и обеспечивает корм скоту. Древесную часть кустарника собирают в конце сухого сезона для бытового отопления или продажи местным производителям, которые сжигают ее для выработки электроэнергии. Такой подход может обеспечить значительный рост как продовольствия, так и биоэнергии, а также ежегодных запасов CO_2 в почве и корнях. Кроме того, он дает возможность увеличить доходы фермеров и количество рабочих мест среди сельского населения. Вечнозеленая энергетика уже широко распространена в Шри-Ланке, разрабатывается в Африке и может применяться в Азии и Латинской Америке. Она была бы идеальным способом производства биомассы в BECCS, если бы стала доступной, не жертвуя в пользу производства продуктов питания.

Расширение агролесоводства имеет большие перспективы. По прогнозам *Global Evergreening Alliance*, к 2050 г. одни только деревья и кустарники, удобряющие почву, будут производить 1200 млн т биомассы. Агролесоводство уже имеет широкое распространение: 43% сельскохозяйственных земель в мире покрыты лесом более чем на 10%, причем большая их часть находится в тропиках. В период с 2000 по 2010 г. прирост деревьев на фермах увеличился на 2% во всем мире. Миллионы сельчан, проживающих в тропиках, внедрили методы агролесоводства, и все больше их присоединяется. Глобальный альянс *EverGreening* начал кампанию по ежегодному сокращению CO_2 на 20 млрд т к середине века. Однако реализация этого проекта потребует более последовательной поддержки фермеров с помощью распространения сельскохозяйственных знаний.

Несмотря на усилия некоторых убежденных ученых и фермеров, агролесоводство в США отстает от остального мира. Нет никакой причины биофизического свойства для отказа от его применения: агролесоводство имеет успех в других регионах с умеренным климатом и на опытных участках в США. Нежелание — скорее вопрос общих установок в земледелии. Механизированное сельское производство также не накладывает ограничений: примерно 9% сельхозугодий в странах Европейского союза используются с применением методов агролесоводства. Возможно, выработка биомассы может начаться у кромки полей и постепенно прокладывать себе путь. (Посадка лесополос, защищающих поля от ветровой эрозии, помогла вывести центральные районы США из зоны действия пыльных бурь в 1930-х гг.) И Франция, и Китай разработали системы посадок деревьев в крупных механизированных хозяйствах. В Индии также наблюдаются значительные сдвиги в этом направлении.

Механизированные фермы в таких местах, как «кукурузный пояс» США, могут внедрять многолетние травы, в частности просо прутьевидное и мискантус. Эти высокие травы можно выращивать, собирать и транспортировать на биохимические заводы, которые производят топливо или электричество. Технологии точного земледелия помогают фермерам определить участки полей, на которых плохо растут продовольственные культуры, и использовать их под многолетние травы.

Перерабатывая определенные травянистые виды в целях получения энергии, можно также изготовить продукт, называемый протеиновым концентратом листьев. Он примерно на 50% состоит из белка и насыщен витаминами и минералами. Хотя он вполне съедобен и для человека, но может быть лучшим заменителем сои для домашнего скота. Травы могут давать более высокие урожаи этого белка с гектара, чем соя или любая другая продовольственная культура, а поскольку травы многолетние, они связывают углерод в почве.

Путь вперед

Невозможно и нежелательно занимать площади размером с Австралию под выращивание биомассы, дабы удовлетворить потребности BECCS и решать климатические проблемы. Более рациональное производство и потребление биомассы может способствовать сокращению выбросов углекислого газа, не нарушая продовольственных запасов или лесных ресурсов, однако не может устранить

наши климатические проблемы. МГЭИК мудро отмечает, что, скорее всего, в сценариях правильно ограничить потепление до 1,5° C, в связи с чем необходимы скоординированные мероприятия по повышению продовольственной безопасности и ограничению изменений в землепользовании. По-прежнему будут необходимы и другие быстрые и глубокие преобразования: сведение к нулю эмиссии парниковых газов, в том числе сокращение потребления богатыми странами и отдельными лицами, переход на экологически чистую энергию, электрификация транспорта и промышленности.

Возможно, мы сможем найти духовное подкрепление у местных жителей, которые уже пытаются разумно жить в будущем, опираясь на использование биомассы. Интересно рассмотреть пример крестьянского кооператива *Las Cañadas campesino* в Веракруссе, Мексика. В результате лесозаготовок 70–90% естественных влажных тропических лесов региона были превращены в пастбища. В этом горном ландшафте солнце и ветер не вселяют надежды. Приблизительно 20 семей следуют лучшим примерам мирового опыта по использованию биомассы для удовлетворения своих потребностей. Они высадили древесные растения на своих кукурузных полях и пастбищах, укоренили бамбук и быстрорастущие порослевые деревья, дающие топливную древесину, распространили 50 тыс. деревьев местных видов для восстановления лесов и установили экологически чистые кухонные плиты, чтобы сохранить деревья. Они экспериментируют с газогенератором, в котором сжигают древесину и получают электроэнергию. Член кооператива Рикардо Ромеро (Ricardo Romero) делает расчеты, показывающие, что семья может удовлетворить свои ежегодные потребности в топливе для приготовления пищи, имея участок размером примерно 26 × 26 м. Возможно, все мы можем извлечь уроки из дальновидности этого кооператива. ■

Перевод: В.И. Сидорова

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Гловер Д., Реданолд Д. Лечение почв Африки // ВМН, № 7, 2016.
- Bioenergy and Carbon Capture and Storage. Christopher Consoli. Global CCS Institute, 2019.
- Drawdown Review 2020. Project Drawdown: <https://drawdown.org>

СКРЫТАЯ ЦЕНА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

ХИМИЯ

**ПОСКОЛЬКУ
СИТУАЦИЯ
С ЛЕСНЫМИ
ПОЖАРАМИ ПО ВСЕМУ
МИРУ УХУДШАЕТСЯ,
ПОПЫТАЕМСЯ
ВЫЯСНИТЬ,
КАК ВЫБРОСЫ
ОТ ПОЖАРОВ ВЛИЯЮТ
НА ЗДОРОВЬЕ
ЧЕЛОВЕКА**

Кайл Дикман

Из кабины DC-8, авиалайнера NASA, пилот осматривает пожар Ridgetop Fire в Монтане. Пока самолет пролетает сквозь шлейф дыма по направлению ветра, ученые и инженеры на борту собирают данные о составе выбросов.



ОБ АВТОРЕ

Кайл Дикман (Kyle Dickman) — независимый журналист и пишущий редактор журнала *Outside*, автор книги «На пылающей границе» (*On the Burning Edge*, 2015). В течение пяти сезонов принимал участие в борьбе с природными пожарами в Калифорнии.



«Интересно. Не слишком плотный», — произнес Джим Кроуфорд (Jim Crawford), специалист по химии атмосферы. В этот день в конце июля 2019 г. Джим, с пластырем, наклеенным за ухом от укачивания, наблюдал за клубами дыма от лесного пожара, видимого из кабины бывшего коммерческого реактивного авиалайнера, который в *NASA* переоборудовали в воздушную лабораторию. Лайнер приближался к столбу дыма с наветренной стороны. В салоне самолета 35 ученых и инженеров проводили калибровку аппаратуры. Все волновались: будут ли их приборы, предназначенные для измерения концентрации загрязняющих веществ в городских условиях, работать в воздухе с высоким содержанием макрочастиц? Как отреагирует на столб дыма 50-летний самолет? *DC-8* задрожал и подпрыгнул, когда вошел в шлейф дыма, поднимавшегося на высоту более 3,6 тыс. м над пожаром, бушевавшим за пределами Мизулы, штат Монтана. «Сорок пять секунд, потом разворачивайтесь», — дал указания пилотам Кроуфорд. Турбулентность была на удивление слабой, и ученый хотел при возвращении вновь пройти через эту зону.

Это был всего лишь третий полет в ходе исследований воздуха в рамках *FIREX-AQ*, крупного трехлетнего проекта под руководством Национального управления океанических и атмосферных исследований (*NOAA*) и *NASA*. Цель проекта — выяснить точный химический состав дыма, выделяющегося при горении биомассы, и определить, помимо прочего, когда и почему он наиболее опасен для здоровья человека. Прошлым летом за шесть недель *DC-8* и пара *Twin Otter*, снабженных инструментарием для отбора проб воздуха, пролетели сквозь 100 разных столбов дыма: от пузырька дыма над крошечным сельскохозяйственным

палом в Канзасе до грибовидного облака, поднявшегося на высоту почти 9,5 тыс. м, от пожара *Williams Flats* (один ученый сравнил его с извержением вулкана) в штате Вашингтон. Никогда ранее дым от горения биомассы не изучался в таких масштабах и в таких деталях. Несмотря на то что почти треть твердых частиц появляется в атмосфере в результате пожаров, как сказал в 2018 г. руководитель Агентства по охране окружающей среды, «очень мало исследований, в которых изучается особая роль различных компонентов дыма в развитии и тяжести заболеваний при действии дыма на человека».

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- О мгновенных и хронических эффектах воздействия дыма от лесных пожаров на организм человека известно мало. В связи с увеличением площади и появлением новых очагов лесных пожаров это явление представляет собой растущую угрозу для здоровья человека.
- Беспрецедентный проект под руководством *NOAA* и *NASA* собрал более 400 ученых для изучения точного химического состава дыма при горении биомассы и его изменений со временем.
- Данные, собранные во время воздушной кампании, помогут определить, какие виды пожаров наиболее опасны для здоровья. Таким образом можно получить информацию о том, как регулируется и осуществляется пожаротушение, например зажигание встречного огня.



Пожар на территории водосборного бассейна Лик-Крик, штат Айдахо, — один из лесных пожаров на западе США, который 2 августа 2019 г. был выбран для изучения в рамках проекта FIREX-AQ

Известно, что хроническое воздействие мелкодисперсных частиц, присутствующих в любом дыме, помимо иных проблем, может приводить к заболеваниям сердца и легких, нарушениям сердечного ритма и обострению астмы. По оценкам, такое воздействие стало причиной 4,2 млн случаев преждевременной смерти в 2016 г. Более того, с долгосрочным воздействием озона, газа, образующегося в результате химических реакций при поступлении дыма в атмосферу, связывают по меньшей мере 1 млн случаев преждевременной смерти в год. При этом отсутствует фундаментальное понимание того, как и когда эти и другие токсичные компоненты образуются в дыме при горении разного вида биомассы. В настоящее время контролирующие органы, устанавливающие нормативы качества воздуха, считают, что при горении разной биомассы выбросы одинаковы, хотя это не так. Изучая эти процессы, команда *FIREX-AQ* надеется улучшить точность прогнозов в отношении выбросов загрязняющих веществ во время лесных пожаров таким образом, чтобы тренеры лучше понимали, когда отменять футбольные тренировки, больницы могли ожидать наплыва пациентов с ослабленным иммунитетом,

а регуляторы могли защитить от опасного воздействия людей, работающих на открытом воздухе. Данные *FIREX-AQ* также могли бы помочь землепользователям начинать контролируемый пал, уменьшающий разрушительные последствия будущих природных пожаров и тяжесть их воздействия на здоровье.

Кроуфорд проверил свой планшет, просматривая обновляемые в режиме реального времени данные анализа отобранных проб сотен частиц и газов. Последний раз, когда Джим летал на *DC-8*, он изучал загрязняющие вещества в городском воздухе Сеула в Южной Корее. По словам Кроуфорда, даже в маленьких городах исследователи фиксируют более высокий уровень загрязнения по сравнению с тем, что наблюдали он и его команда в тот день. «Но какой вклад вносят все эти пожары? — спрашивает Джим. — Какое количество озона образуется при пожарах? Какие химические процессы задействованы? И как можно контролировать природное явление?» Карстен Варнеке (*Carsten Warneke*), ведущий исследователь земных систем *NOAA* в Боулдере, штат Колорадо, объясняет, что в моделях качества воздуха дым



от лесных пожаров учитывается как смог, тогда как это совершенно иная проблема.

Примерно в 560 км к югу, на базе ВВС Национальной гвардии Гоуэн-Филд в Бойсе, штат Айдахо, Варнеке и еще 50 ученых тщательно анализировали метеорологические условия, состав растительных горючих материалов, спутниковые данные в режиме реального времени и обновленные сведения о текущих пожарах, чтобы определить, какие из лесных пожаров на западе США соответствуют большинству критериев, позволяющих достичь цели *FIREX-AQ*. «Ученых много, и каждого интересуют несколько разные вещи», — рассказала Эмбер Соья (Amber Soja), младший научный сотрудник Национального аэрокосмического института, отвечавшая за предоставление кратких сведений о пожарах, наблюдавшихся в тот день, 400 исследователям, занятым в проекте *FIREX-AQ*.

В тот день команда выбрала для своей миссии пожар в Норт-Хилс в Монтане, когда *DC-8* уже вырубивал на взлетную полосу. Среди девяти рассматривавшихся вариантов у этого пожара был наиболее выраженный столб дыма. Пожар, охвативший относительно небольшую территорию примерно в 1,5 тыс. га, был совершенно обычным и именно поэтому представлял интерес с научной точки зрения. Несмотря на то что

пожарные лесохозяйственной службы США все еще пытались взять пламя под контроль, они дали *DC-8* разрешение на отбор проб в шлейфе дыма в разное время и в разных точках для анализа состава дыма и происходящих в нем изменений по мере движения по ветру, при попадании дыма в другую среду и другие погодные условия.

После того как *DC-8* прошел сквозь шлейф дыма 16 раз в течение часа, Кроуфорд получил из командного центра сообщение от Варнеке. В сообщении был спутниковый снимок столба дыма, выбрасываемого над облаками прямо у подножия горы Шаста в Калифорнии, почти в 1,3 тыс. км к юго-западу. Варнеке обвел шлейф дыма кружком и написал рядом красными чернилами: «Сейчас же отправляйтесь туда!»

Беспрецедентный проект

Проект *FIREX-AQ* (*Fire Influence on Regional to Global Environments and Air Quality*, «Влияние пожаров на региональную и глобальную окружающую среду и качество воздуха») начался в лаборатории по изучению пожаров в Монтане. Химик-исследователь NOAA Джим Робертс (Jim Roberts), сотрудник этой лаборатории и участник группы ученых, разработавших метод измерения концентрации атмосферного азота во времена озонового кризиса 1970-х гг., постепенно заинтересовался изучением



В салоне DC-8 (1). Постдок Сю Лу (Xu Lu) добавляет жидкий азот в масс-спектрометр, использующийся для измерения концентрации целого ряда газов, присутствующих в дыме от лесных пожаров (2). Счетчики частиц, прикрепленные к крыльям самолета (3). Когда аппарат MASTER открыт во время полета, он делает снимки огня сквозь дым (4). На базе аспиратора Ванесса Селимовиц (Vanessa Selimovic) готовит контейнеры для отбора образцов воздуха (5).

кислот, присутствующих в дыме от лесных пожаров. В 2009 г., выполняя эксперименты по сжиганию веток желтой сосны и других деревьев, характерных для запада США, Робертс обнаружил особенно вредное соединение — изоциановую кислоту. Регулярное воздействие этого вещества от таких источников, как сигареты и кухонный чад, может стать причиной развития катаракты, ревматоидного артрита и болезней сердца.

Вскоре после проведения исследования Робертс находился в своем офисе в Боулдере, штат Колорадо, когда начался самый разрушительный лесной пожар в истории штата, в результате которого были уничтожены десятки тысяч гектаров растительности и несколько сотен домов на окраине Боулдера. Робертс, заинтересовавшись, подтвердятся ли результаты его лабораторных исследований в реальном мире, вытащил наружу аппарат для измерения концентрации кислот, чтобы проанализировать воздух в Боулдере. Ученый обнаружил самую высокую концентрацию изоциановой кислоты в атмосферном воздухе, которая когда-либо была зафиксирована. До этого никому и в голову не приходило ее определять. Робертс рассказывает: «Я не спал две ночи. Местные жители, сжигающие биомассу, вообще не знали о том, что в дыме присутствует изоциановая кислота. О чем еще мы не знали?»

В целом качество воздуха в американских городах значительно улучшилось после принятия конгрессом в 1970 г. Закона о чистом воздухе. Однако если лесные пожары возникают поблизости от городских зон, дым сводит на нет все эти достижения. Все восемь городов, оказавшихся в верхних строчках рейтинга городов с самым высоким уровнем загрязнения воздуха за 2019 г. по такому показателю, как концентрация озона, находятся на западе. По такому показателю, как концентрация $PM_{2,5}$ — частиц размером менее 2,5 мкм, которые могут проникать в легкие человека и поступать в кровоток, — из 25 городов топ-листа 23 города расположены на западе и на Аляске. Эта тенденция почти без сомнения сохранится: лесохозяйственная служба ожидает, что площадь территорий, затронутых пожарами, к 2050 г. увеличится вдвое.

Основная причина этой проблемы — изменение климата: в западных районах США он становится все более теплым и засушливым. В июле 2019 г. Парк Уильямс (Park Williams), ученый из Колумбийского университета, занимающийся климатическими моделями, опубликовал в журнале *Earth's Future* результаты исследования, демонстрирующие, что почти пятикратное увеличение площади выжженных территорий в Калифорнии с 1972 по 2018 г. весьма вероятно связано с повышением



Оборудование на базе в Бойсе, Айдахо (1). Ученые-исследователи Карстен Варнеке (слева) и Джим Кроуфорд (2).

температуры в жаркие дни на $1,4^{\circ}\text{C}$. По словам Уильямса, виновато потепление, вызванное антропогенными факторами.

Важную роль в ухудшении ситуации с пожарами играет также состояние лесов. После 100 лет жестокого подавления пожаров, необходимого для экосистем на западе США, плотность растительности во многих лесах намного превышает историческую норму. Например, на некоторых участках Сьерра-Невады в Калифорнии на 0,4 га произрастает 1 тыс. деревьев, а когда-то на такую же площадь приходилось от 50 до 70 деревьев. Тем временем люди продолжают переселяться в биомы, адаптировавшиеся к воздействию огня. В 1990-х гг. в США 30,8 млн человек проживали поблизости или непосредственно на тех территориях, где регулярно возникали пожары; два десятилетия спустя там живут уже 43,4 млн человек. Смертельное сочетание этих двух тенденций стало очевидным во время пожара *Camp Fire* в 2018 г. Пламя, охватившее калифорнийский город Парадайз с населением 26,8 тыс. человек, уничтожило 18 804 зданий и унесло жизни по меньшей мере 85 человек; большинство из них погибли еще до восхода солнца.

Каждый год пожарами охвачено примерно 4% суши нашей планеты, и эта растущая разрушительная сила вряд ли представляет проблему только для Америки. На момент написания этой статьи в результате пожаров в австралийском буше, начавшихся в конце 2019 г., выгорели земли на площади, вдвое превышающей площадь пожаров в Калифорнии в 2018 г. и на Амазонке в 2019 г. вместе взятых. Несмотря на то что с превращением участков дикой природы в ранчо и пахотные земли общая площадь территорий, ежегодно охваченных пламенем, уменьшается, изменение климата теперь благоприятствует возникновению пожаров в тех областях, где исторически не зафиксированы крупные лесные пожары, и способствует ухудшению пожарной обстановки в местах, для которых такое явление было характерным. Летом 2018 г. в Северной Ирландии наблюдались небывалые по масштабам пожары, так же как и в арктических и субарктических районах Сибири на площади почти 3 млн га. Специалист по пожарному делу Стивен Пайн (Stephen Payne), почетный профессор Аризонского университета, назвал эту эпоху пиромом.

Изучение дыма от лесных пожаров прямо не относилось к компетенции ученых NOAA; просто стало невозможно его игнорировать. В начале 2000-х гг., изучая дымку, переносимую в арктические районы Аляски из Азии, а также качество воздуха в городах на северо-востоке, ученые, к своему удивлению, обнаружили химический след природных пожаров во всех полученных данных. «Многие годы мы сосредоточивали внимание на загрязнении атмосферы городов, но, пролетая над городскими зонами, мы увидели все эти вещества от лесных пожаров», — говорит Робертс. Он все больше убеждался в том, что дым и качество воздуха заслуживают особого внимания и тщательного изучения со стороны NOAA. Тогда, как и сейчас, прогнозы выбросов от лесных пожаров по данным наблюдений были недостоверны. В статье, опубликованной в 2008 г. в *Journal of Applied Remote Sensing*, сравнение четырех моделей выбросов от пожаров показало, что оценки ежегодного вклада лесных пожаров в увеличение концентрации атмосферного CO_2 могут быть занижены в десять раз. Одна из проблем заключалась в том, что модели выбросов от пожаров в Северной Америке основывались на данных, собранных всего для 39 разных пожаров, то есть наблюдался недостаток информации, учитывающей разнообразие пожаров.

Интерес ученых возростал. Джим Робертс и Карстен Варнеке, партнеры по научно-исследовательской деятельности в NOAA, обратились к своему коллеге из Университета Монтаны Бобу Йокелсону (Bob Yokelson), с которым давно сотрудничали. Боб занимается изучением дыма от лесных пожаров

уже почти 30 лет. Йокелсон, мускулистый бывший пожарник из Монтаны, помог с запуском первоначальной версии проекта *FIREX-AQ*. Как говорит Боб, еще 20 лет назад полевыми исследованиями дыма от лесных пожаров занимались только он и несколько его коллег-профессоров: они арендовали *Twin Otter*, оборудовали его измерительными приборами и проводили исследования вокруг дымовых столбов. Боба и его коллег интересовали те же аэрозоли, твердые частицы и газы, что привлекают внимание *FIREX-AQ*, но их оценки были несравненно менее точными. Йокелсон преувеличивал простоту полевых исследований, но аппаратура, необходимая для запуска полноценного проекта, не применялась — это просто было слишком дорого и рискованно. «Мы летели в будущее вслепую», — рассказал Йокелсон.

Когда на протяжении нескольких сезонов подряд такое явление, как дым от лесных пожаров, достигло беспрецедентных масштабов и стало ясно, что наступила эпоха огня, на крупные исследовательские кампании начали выделять миллионы долларов. Кроме DC-8, предназначенного для по-

Сравнение четырех моделей выбросов от пожаров показало, что оценки ежегодного вклада лесных пожаров в увеличение концентрации атмосферного CO_2 могут быть занижены в десять раз

летов на больших высотах и на дальние расстояния, команда *FIREX-AQ* снарядила инструментарием для отбора проб воздуха проворные винтовые самолеты, для того чтобы можно было на более низкой высоте подходить ближе к столбам дыма, так же как и к сельским населенным пунктам, затянутым дымом. Ученые также оборудовали грузовики для анализа дыма на земле. На борту реактивного самолета исследователи использовали лазеры с разной длиной волны для получения объемной картины столба дыма в реальном времени; аппарат для определения ацетонитрила, химического вещества, служащего индикатором видового состава горящей биомассы; другие датчики использовались для обнаружения коричневого и черного углерода, субмикронных аэрозольных частиц и других компонентов из длинного перечня. С помощью такого сочетания используемого оборудования можно оценить содержание любых частиц

и газов, какие только способна уловить аппаратура на данном этапе развития технологий.

Более точно определяя состав дыма и процессы, в результате которых образуются его наиболее токсичные продукты, ученые, составляющие прогнозы качества воздуха, смогли бы более точно предсказывать влияние выбросов от лесных пожаров на здоровье человека. Знание о том, как различается дым пожаров разных типов, могло бы также снизить нагрузку, связанную с пожаротушением, особенно когда речь идет о зажигании встречного огня. Такие контролируемые палы меньшей интенсивности имитируют природные пожары и осуществляются для снижения количества горючих материалов на пути возможных лесных пожаров. Общеизвестно, что начать встречный пал очень трудно по причинам, связанным с социальными последствиями, охраной окружающей среды и за-

Более точно определяя состав дыма и процессы, в результате которых образуются его наиболее токсичные продукты, ученые, составляющие прогнозы качества воздуха, смогли бы более точно предсказывать влияние выбросов от лесных пожаров на здоровье человека

конодательным регулированием. Агентство по охране окружающей среды предъявляет строгие требования к дыму от встречных палов, хотя ни одно полевое исследование не подтвердило, что выбросы в результате пала меньшей интенсивности настолько же токсичны, как выбросы от бушующего пламени лесного пожара. «Когда речь идет о дыме, затянувшем небо, неважно, когда придется плавать», — говорит Эмбер Соия. Она имеет в виду, что независимо от того, решит ли сам землепользователь начать пал или предоставит природе решать, когда будет гореть приспособившийся к пожарам ландшафт, небо будет затянуто дымом. И все же некоторые виды дыма могут быть более опасны для здоровья человека по сравнению с другими. «Нам необходимо разобраться с показателями выбросов так, чтобы люди на местах могли принимать оптимальные решения».

Разнообразие

летучих органических соединений

Осенью 2016 г. команда FIREX-AQ отправилась в Монтану в лабораторию по изучению пожаров, чтобы приступить к изучению поэтапного формирования выбросов. Для того чтобы узнать, что произойдет с дымом в процессе его переноса по ветру и как образуются вредные аэрозоли и озон, ученые должны были понять, каков состав дыма в начальной точке. Может быть, при горении определенных растений выделяется дым с большим содержанием озона и мелкодисперсных частиц по сравнению с дымом от сжигания другой растительности?

Исследователи собрали образцы желтой сосны из Монтаны, кустов сирени из Калифорнии, дуба из Аризоны и 18 других групп видов, регулярно горящих на западе США. Ученые высушили и взвесили растения, расстелили их на полотне из мелкой ячейки сетки под кожухом массивного вентилятора и подожгли. Для каждого древесного горючего материала использовали два типа горения: беспламенное, выделяющее вязкий, как лава, дым, и пламенное, при котором дым вырывается вместе с пламенем, как салют.

К своему удивлению, исследователи выяснили, что на характер выбросов гораздо больше влияет температура пожара, чем то, какие именно растения горят. Определенные летучие органические соединения (ЛОС) выделяются при низкотемпературном горении, тогда как другие появляются преимущественно при высоких температурах огня. Температуру горения можно использовать для предсказания примерно 80% таких выбросов. Эти результаты были опубликованы в 2018 г. в журнале *Atmospheric Chemistry and Physics*.

Во время некоторых экспериментов ученые отобрали пробы дыма в тефлоновые пакеты, освещаемые УФ-излучением для имитации солнечного света. Исследователей интересовали микрочастицы размером меньше 2,5 мкм, которые выбрасываются при любом пожаре. Долгосрочное воздействие таких частиц может оказаться смертельным, даже когда их концентрация ниже установленной ПДК. На западе США в 2017 и 2018 гг. в зонах, где концентрация *PM 2,5* превысила установленные Агентством по охране окружающей среды стандарты качества воздуха, находилось более 10 млн человек. По оценкам, за 30 лет это число будет близко к 82 млн. Предполагается, что к 2100 г. каждый год только в США в результате хронического вдыхания дыма от лесных пожаров будут погибать 40 тыс. человек.

Как и ожидалось, в тефлоновых пакетах произошло быстрое рассеяние мелкодисперсных частиц и их концентрация уменьшилась. Но в некоторых экспериментах через несколько часов определенные химические вещества начали конденсироваться. Как шарики ртути, собирающиеся вместе,

другие частицы оседали на этих увеличивающихся поверхностях до тех пор, пока уровень *PM 2,5*, снизившийся несколькими часами ранее, вновь не увеличился до новых значений. Карстен Варнеке не был уверен в том, какой процесс объясняет повторное формирование мелкодисперсных частиц, но полагал, что определил начальную точку. Концентрация *PM 2,5* чаще всего возрастала в присутствии пирокатехина, вещества с крупными молекулами, входящего в состав основных компонентов древесины и выделяющегося при беспламенном горении. В связи с этим открытием наибольший интерес представляла идея о том, что если установить взаимосвязь между температурой пожара и образованием мелкодисперсных частиц, тогда можно будет спрогнозировать концентрацию *PM 2,5*, выделяющихся при горении, с помощью спутников, уже определяющих интенсивность пожаров. Варнеке и Мэтт Коггон (Matt Coggon), исследователь из *NOAA*, также обнаружили, что пирокатехин может играть ключевую роль в образовании озона, связанного с лесными пожарами.

При повторяющемся воздействии озон ослабляет функции легких. Озон не входит в состав непосредственных выбросов от лесных пожаров, он образуется при наличии в смеси в определенных пропорциях оксида азота, ЛОС и солнечного света. В дыме всегда присутствуют ЛОС, а солнечное излучение способствует пламени. Однако образование соединений азота в результате лесных пожаров имеет свои нюансы. При беспламенном горении растений выделяется аммиак, соединение азота с низкой реакционной способностью. При высокотемпературном горении выделяются летучие оксиды азота. «Вся проблема в том, что в шлейфе дыма довольно активно протекают химические процессы, — говорит Коггон. — При сильных пожарах дым даже в течение часа превратится в нечто совершенно иное по сравнению с тем, каким он был вначале».

Причины таких изменений хорошо известны уже почти 20 лет. При сильных лесных пожарах оксиды азота, выделяющиеся при горении растений и входящие в состав дыма, за счет переноса тепла при пожаре поступают в верхние слои тропосферы. По мере подъема некоторые соединения взаимодействуют с радикалами до тех пор, пока в результате целого каскада реакций выделившийся на начальной стадии оксиды азота не превратятся в пероксиацетилнитрат (ПАН), молекулы которого относительно стабильны при достаточно низких температурах. Пока перенос дыма продолжается в более холодных высоких слоях тропосферы, азот связан и процесс образования озона заморожен.

Однако когда дым опять начинает просачиваться в более низкие слои с более высокой температурой, ПАН распадается и вновь появляются оксиды

азота. Внезапно в сотнях и даже тысячах километров по направлению движения потока воздуха от места пожара озон может образоваться в количествах, токсичных для людей. Это помогает объяснить, почему во время некоторых лесных пожаров резко повышается концентрация озона в городах на Среднем Западе или даже на востоке, когда шлейф дыма, родившийся на западе, переносится в восточном направлении. В городских зонах, где уже и так высокое содержание оксидов азота из-за автомобилей и промышленности, работающей на ископаемом топливе, концентрация этих веществ может превысить нормативы качества воздуха, когда жарким летним днем ветер принесет выбросы от лесных пожаров. Поэтому в Сиэтле в 2018 г. было самое плохое качество воздуха по нескольким показателям.

Коггон и Варнеке хотели выяснить, существуют ли в выбросах от пожаров и другие молекулы, которые играют такую же роль, как ПАН. Во время лабораторных исследований они обнаружили производные пирокатехина, соединения — предшественники нитроароматических соединений, которые, как ни странно, используются для лечения кашля. Сначала эта находка не показалась особенно интересной — всего лишь еще одно вещество среди сотен обнаруженных ЛОС. Но через два года после лабораторных экспериментов Мэтт Коггон разработал химическую модель, показывающую, что нитроароматические соединения могут играть ключевую роль в цикле азота и, следовательно, в образовании озона. Как говорит Коггон: «Когда присутствовали эти вещества, озона было меньше».

Просмотрев предварительные расчеты, основанные на проверке модели, Коггон предположил, что при лесных пожарах нитроароматические соединения должны образовываться в значительных количествах. Эти соединения никогда не рассматривались в таком контексте. Поэтому, модифицировав существующие средства измерения, Варнеке и Коггон разработали аппарат для анализа концентрации таких веществ в воздухе каждую десятую долю секунды. Именно этот измерительный прибор — масс-спектрометр на основе реакций переноса протона, — имеющий достаточно малые размеры, чтобы разместиться на полке в салоне *DC-8*, во время полета предупредил Коггона о том, что обнаружилось нечто удивительное.

Сигналы в дыму

«Входим в него! Входим в него сейчас!» — передал Кроуфорд по внутренней связи, когда в салоне прозвучал звуковой сигнал и *DC-8* начал дрожать. С пожара в Норт-Хилс в Монтане *DC-8* отправился к новому пункту назначения и через полтора часа, снизившись, оказался над обозначенным Варнеке участком у горы Шаста, где на площади 5,7 тыс. га

бушевал пожар. Когда самолет вошел в шлейф дыма, свет стал оранжевым и салон наполнил запахами горящей древесины.

Коггон сидел в салоне самолета на уровне левого крыла, внимательно изучая данные спектрометра на мониторе. На графике отражались сотни различных ЛОС, но внимание Коггона было сосредоточено на пирокатехине, количество которого быстро фиксировалось и в данный момент было очень высоким. «Здесь его еще больше, чем мы видели два дня назад!» — воскликнул Мэтт. Спектрометр не способен обнаружить нитроароматические соединения, только их прекурсоры, но у Коггона уже имелись некоторые предположения о том, что произойдет с пирокатехином. Внезапно Мэтт вскочил и, шатаясь, поскольку самолет трясло, направился к Уайяту Брауну (Wyatt Brown), аспиранту, находившемуся в первой трети салона. Браун следил за измерительным прибором, способным обнаружить то, что было недоступно масс-спектрометру Коггона: субмикронные частицы аэрозолей, таких как нитроароматические соединения. «Ты это видишь?!» — спросил Коггон. Браун показал на монитор: вне всяких сомнений, был обнаружен один из видов нитроароматических соединений — нитропирокатехины.

Реакция Коггона была очень эмоциональной. Несмотря на то что он стал свидетелем события, подтверждающего наличие в реальном мире химических процессов, наблюдавшихся при реализации моделей, новые ценные данные были лишь началом сложного пути. Позднее Мэтт Коггон предположил, что понадобятся два года дальнейших исследований, чтобы определить, представляют ли собой нитропирокатехины хранилище азота, в котором, как в ПАН, этот элемент связан временно и образование озона лишь задерживается, или азот фиксируется постоянно и формирование озона останавливается. Обе теории потенциально очень важны для составления прогнозов об образовании озона в результате пожаров и, следовательно, о влиянии дыма на людей.

В ходе кампании такие загадки постепенно стали обычным явлением. Исследователям, которые пытались отобрать образцы биомассы, горевшей в Канзасе, удалось случайно провести замеры во время пожара в жилом доме. Анализ этого конкретного примера, возможно, будет особенно полезен, если принимать во внимание то, с какой регулярностью лесные пожары уничтожают созданную человеком инфраструктуру. Были и другие неожиданности. Например, сразу после начала контролируемого пала низкой интенсивности в основном лесу во Флориде образовалось очень большое количество озона, тогда как во время сильного лесного пожара в Вашингтоне озон, по-видимому, почти не образовывался. По предположению Карстена Варнеке, которое, как он надеется,

подтвердят данные, различия заключались в том, что во Флориде огонь уничтожал богатый азотом лесной горючий материал в яркий солнечный день с невысоким шлейфом дыма. В Вашингтоне, где высота столба дыма достигала 9,4 тыс. м, протеканию химических реакций препятствовал сам дым, слишком плотный для проникновения солнечного света. Вероятно, самое неприятное открытие — вторичное формирование мелкодисперсных частиц. В нескольких пожарах исследователи наблюдали снижение и снова увеличение концентрации *PM 2,5*. Ответственны ли за подобные явления в природе те же процессы, которые ученые наблюдали в лаборатории?

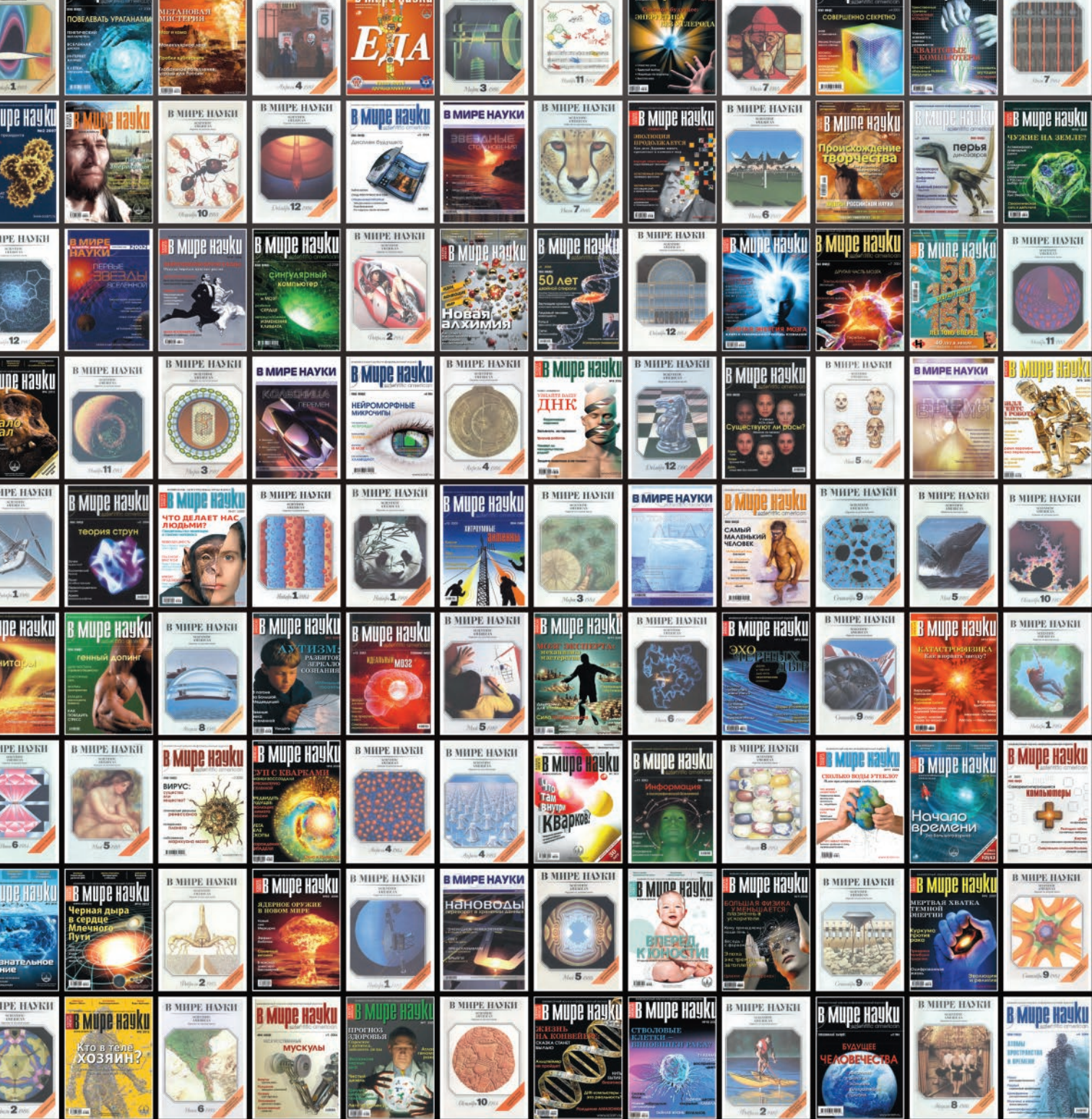
Солнце, свет которого в течение часа пересекал штрихами шлейф дыма от пожара у горы Шаства, опустилось над Тихим океаном за горизонт. Из иллюминатора самолета все еще был виден пожар на земле — длинная оранжевая лента, змеей извивающаяся в темноте. У *DC-8* заканчивалось топливо. Выполнив вираж, пилоты направили самолет на восток, к Бойсе, и Кроуфорд наконец оставил кабину. «В том, что касается выбросов, этот конкретный случай — всего лишь капля в море, — сказал Джим. — Но то, что полученные детали можно будет экстраполировать, по-настоящему ценно».

Скоро ученые приступят к менее захватывающим занятиям: сортировке данных и подготовке статей, которые помогут созданию моделей и инструментария для составления прогнозов, сосредоточенных на здоровье людей. В отдаленной перспективе эти средства, как объяснила Сойя, «в идеале должны смягчить регуляторные нормы, чтобы было проще осуществлять больше контролируемых палов». Но тем вечером пропахшие дымом ученые пожимали друг другу руки и обменивались поздравлениями. Кто-то пошутил, что Варнеке должен позаботиться о ледяном душе для команды, когда они приземлятся. ■

Перевод: С.М. Левензон

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Between Two Fires: A Fire History of Contemporary America. Stephen J. Pyne. University of Arizona Press, 2015.
- U.S. Particulate Matter Air Quality Improves Except in Wildfire-Prone Areas. Crystal D. McClure and Daniel A. Jaffe in Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Vol. 115, No. 31, pages 7901–7906; July 31, 2018.
- The Impact of Prescribed Fire versus Wildfire on the Immune and Cardiovascular Systems of Children. Mary Prunicki et al. in Allergy, Vol. 74, No. 10, pages 1989–1991; October 2019.



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

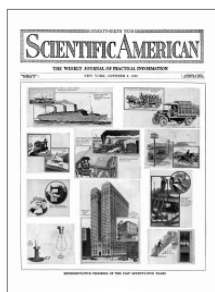




ОКТАБРЬ 1970

Прелесть предместий. Массовое перемещение из центров городов в пригороды, стремительный рост населения на Западе и Юго-Западе США и более низкие темпы демографического роста в 1960-х гг., чем в 1950-х, — вот примечательные тенденции предварительных

результатов переписи населения 1970 г., опубликованных Бюро переписи населения США. Переселение в пригороды было повсеместным. О его масштабах свидетельствует тот факт, что 13 из 25 самых больших городов потеряли жителей, тогда как население 24 из 25 крупнейших агломераций увеличилось. Ситуация в Вашингтоне, округ Колумбия, — характерный тому пример: между 1960 и 1970 гг. население города изменилось незначительно, тогда как в пригороде выросло на 800 тыс. человек (более чем на 38%).



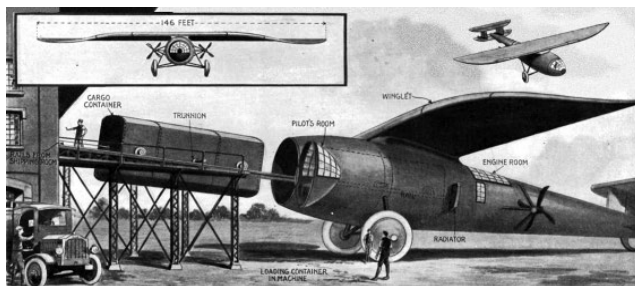
ОКТАБРЬ 1920

Воздушные грузоперевозки.

Предлагаемая машина *Pelican Four-Ton Lorry* представляет собой колоссальный консольный моноплан, приводимый в движение двумя двигателями *Napier* мощностью 460 л.с. Его крейсерская скорость — 116 км/ч, полный вес — 11 тыс. кг, полезный груз — 4 т, топлива достаточно для перелета от Лондона до Парижа. Самое интересное — новая система быстрой погрузки и разгрузки, позволяющая обрабатывать грузы с максимальной скоростью и основанная на аналогичной системе грузовых автомобилей.

Никогда не пробуйте это. Доктор Чарльз Баскервиль (Charles Baskerville) отмечает: хотя полученные к настоящему времени данные по хлору и гриппу пока не позволяют делать выводы,

факты, подобные установленным, указали бы медику на целесообразность использования воздуха с низкой концентрацией хлора как профилактического средства при эпидемиях таких болезней. Доктор Баскервиль проанализировал, насколько серьезно пострадали от гриппа рабочие на предприятиях, где в атмосфере были обнаружены небольшие количества хлора, и предположил, что они заметно менее подвержены простуде и пневмонии.



1920 г.: не только передовой самолет, но и усовершенствованный грузовой контейнер с быстрыми загрузкой и разгрузкой

активные усилия по обеспечению им каждого населенного пункта, желающего идти в ногу со временем. Азбука Морзе казалась совершенным достижением, пока профессор Роял Эрл Хаус (Royal Earl House) не удивил мир своим телеграфом, печатающим буквы. Почти все крупные водные пространства скоро будут пересечены кабелями, которые свяжут континенты и фактически объединят человечество в одну большую семью.

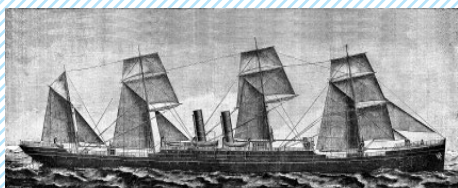


ОКТАБРЬ 1870

Расцвет телеграфной связи.

Быстрый прогресс телеграфной связи за последние 25 лет изменил социальную и коммерческую картину мира. Преимущества и возможности телеграфа настолько очевидны, что сразу же после его появления были предприняты самые

преимущества и возможности телеграфа настолько очевидны, что сразу же после его появления были предприняты самые активные усилия по обеспечению им каждого населенного пункта, желающего идти в ногу со временем. Азбука Морзе казалась совершенным достижением, пока профессор Роял Эрл Хаус (Royal Earl House) не удивил мир своим телеграфом, печатающим буквы. Почти все крупные водные пространства скоро будут пересечены кабелями, которые свяжут континенты и фактически объединят человечество в одну большую семью.



1887 г.: грузовое судно *Golconda* могло перевозить 6 тыс. т груза, загружаемого и разгружаемого краном и грузовыми сетями, и 108 пассажиров

ПРАЗДНУЕМ
175
ЛЕТ

Транспортировка товаров

Волынь упряжки, вагоны и суда можно загружать и разгружать по одному предмету за раз, но более эффективно обрабатывать грузы, упакованные в «мультимодальные транспортные контейнеры» стандартных размеров и формы. Разгрузка судна для перевозки обычных грузов занимает три дня, а контейнеровоза — менее одного. Воздушный транспорт стал звеном в еще более сложной системе. Идея, продемонстрированная на иллюстрации 1920 г., показанной выше, немного опередила свое время. В наши дни для грузовых авиаперевозок и багажа широко используются «устройства комплектования грузов», или авиационные паллеты, форма которых соответствует фюзеляжу конкретных моделей самолетов.

Editor in Chief:	Laura Helmuth	Editors Emeriti:	Mariette DiChristina, John Rennie
Copy Director:	Maria-Christina Keller	Contributing Editors:	Gareth Cook, Lydia Denworth, Ferris Jabr, Anna Kuchment, Robin Lloyd, Melinda Wenner Moyer, George Musser, Ricki L. Rusting
Creative Director:	Michael Mrak	Art Contributors:	Edward Bell, Zoë Christie, Lawrence R. Gendron, Nick Higgins
Managing Editor:	Ricki L. Rusting	Art Director:	Jason Mischka
Chief Features Editor:	Seth Fletcher	Senior Graphics Editor:	Jen Christiansen
Chief News Editor:	Dean Visser	President:	Dean Sanderson
Chief Opinion Editor:	Michael D. Lemonick	Executive Vice President:	Michael Florek
Senior Editors:	Mark Fischetti, Josh Fischman, Clara Moskowitz, Madhusree Mukerjee, Jen Schwartz, Kate Wong	Vice President, Commercial:	Andrew Douglas
Associate Editors:	Gary Stix, Lee Billings, Sophie Bushwick, Andrea Thompson, Tanya Lewis, Sarah Lewin Frasier	Publisher and Vice President:	Jeremy A. Abbate
		© 2020 by Scientific American, Inc.	

В мире науки

Оформить подписку на журнал «В мире науки» можно:

в почтовых отделениях по каталогам:
«Роспечать», подписной индекс: 81736 — для физических лиц, 19559 — для юридических лиц;
«Почта России», подписной индекс: 16575 — для физических лиц, 11406 — для юридических лиц;
«Пресса России», подписной индекс: 45724, www.akc.ru

по РФ и странам СНГ:
 ООО «Урал-Пресс», www.ural-press.ru
 СНГ, страны Балтии и далее зарубежье: ЗАО «МК-Периодика», www.periodicals.ru
 РФ, СНГ, Латвия: ООО «Агентство "Книга-Сервис"», www.akc.ru

Читайте в следующем номере

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК: Празднуем юбилей *Scientific American*

175 лет открытий

Когда вышел первый номер *Scientific American*, планета Нептун еще не была открыта, а сегодня космологи спорят о существовании параллельных вселенных. В статьях этого номера — обзор истории журнала и взгляд в перспективу.

Язык науки

Как изменялись во времени слова, используемые для разговора о науке в этом журнале.

Учитывая наши ошибки

Некоторые из самых отвратительных статей в истории *Scientific American* вскрывают серьезные проблемы, касающиеся авторитета науки.

Информация меняет общество

История науки — это движение по цепочке: научные открытия — технические изобретения и новые технологии — изменения и открытия в области информации.

Возвращение бактерий

Лекарства и вакцины помогли добиться колоссальных успехов в борьбе с инфекционными заболеваниями на протяжении более чем 100 лет. Сегодня лучшей защитой, по-видимому, будут изменения в социальной сфере.

Наше место во Вселенной

Как астрономы обнаружили гораздо более обширный и странный космос, чем кто-либо подозревал.





ПРАВИТЕЛЬСТВО
МОСКВЫ



МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ



МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
М.В.ЛОМОНОСОВА



РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК

ВСЕРОССИЙСКИЙ ФЕСТИВАЛЬ НАУКИ NAUKA +

МОСКВА
9-11 / 17-18
ОКТАБРЯ

СМЕШАННЫЙ
ФОРМАТ
ПРОВЕДЕНИЯ



ВХОД СВОБОДНЫЙ
festivalnauki.ru

ISSN 0208-0621



20010

9 770208 062001 >

FUTURE OF PHYSICS