

ПРИЗРАЧНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Квантовая странность прошла доказательный тест

АНАТОМИЯ СУПЕРВУЛКАНА

О природе крупнейших в мире извержений

В мире науки

SCIENTIFIC AMERICAN

Ежемесячный научно-информационный журнал

www.sci-ru.org

1/2 2019

12+

ТОП

10

НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 2018 ГОДА

ПЛЮС

ФАБРИКА ЗДОРОВЬЯ

Секрет успеха Боткинской больницы

КОНЕЦ ТИШИНЕ

Может ли генная терапия излечить глухоту?





64



114

Темы номера

СПЕЦИАЛЬНЫЙ РЕПОРТАЖ

Десять новых технологий 2018 года 4
Понимание современных изобретений — и связанных с ними проблем — поможет обществу определить, как извлечь из них максимальную пользу

НЕЙРОБИОЛОГИЯ

Обучение во сне — реальность? 16
Кен Паллер и Дельфина Удиетт
С помощью экспериментов ученые выяснили, как можно укрепить память, пока мозг спит

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Дети Солнца 24
Наталья Лескова
Заведующий Долгопрудненской научной станцией ФИАН **Владимир Махмутов** — об изучении космических лучей и процессов их ядерных взаимодействий в атмосфере Земли

МЕДИЦИНА

Фабрика здоровья 32
Наталья Лескова
Как Боткинской больнице удастся долгие годы сохранять лидирующие позиции в столичном здравоохранении, рассказывает ее главный врач член-корреспондент РАН **Алексей Шабунин**

СОДЕРЖАНИЕ

Январь/февраль 2019

КОНВЕРГЕНТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Биопломба на легкое 40
Наталья Лескова
В Курчатовском комплексе НБИКС-природоподобных технологий решают амбициозную задачу разработки «умных» биосовместимых материалов

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

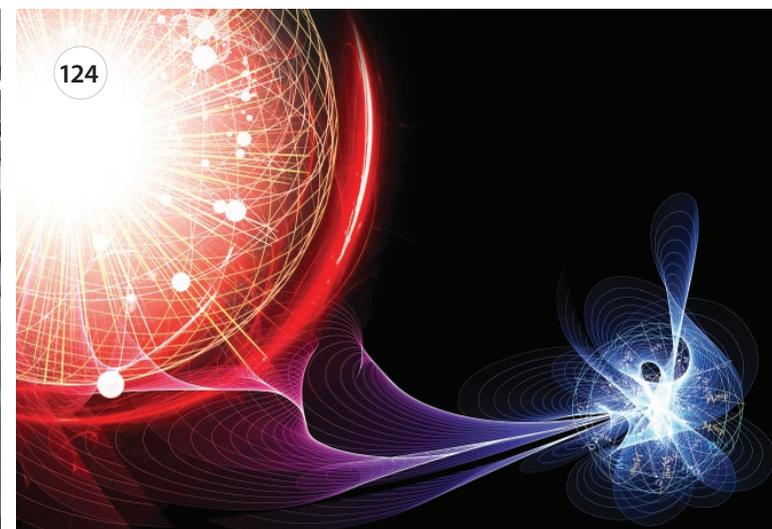
Диагностика для реактора 46
Наталья Лескова
Ученые Томского политехнического университета создают уникальное оборудование для неразрушающего контроля различных технических систем

МИКРОБИОЛОГИЯ

Командные игроки 54
Рогир Браакман и Джеффри Марлоу
Партнерские взаимоотношения в мире микробов распространены в природе гораздо шире и более значимы, чем мы представляли



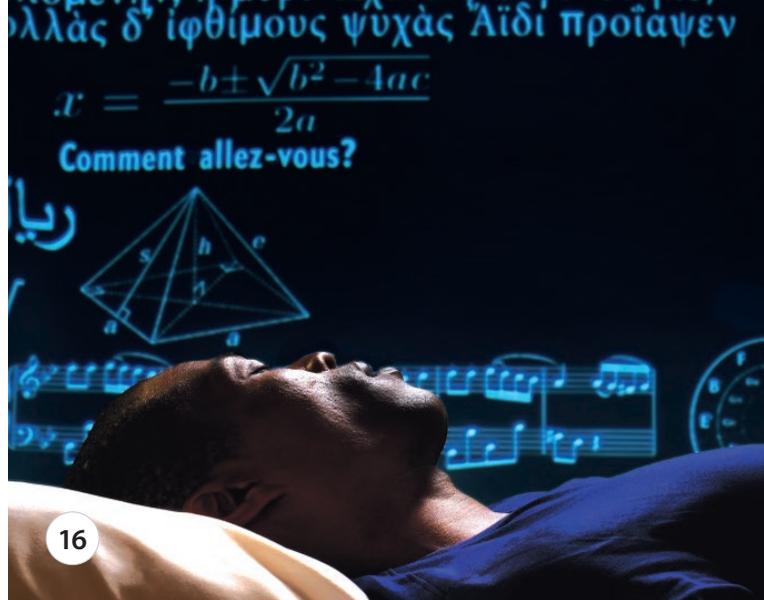
32



124



152



16

АСТРОНОМИЯ

Назад во времени

Дэн Коу

Астрономы обнаружили во Вселенной несколько самых удаленных галактик, открывающих окно в ранее неизвестный период истории космоса

МАТЕМАТИКА

Геометрия против выборных махинаций

Мун Дюшин

Математики разрабатывают криминалистические методы, чтобы выявить политические махинации с географическими картами, лишаящие граждан права голоса

СПЕЦИАЛЬНЫЙ РЕПОРТАЖ

Наука о неравенстве

Высокий уровень экономического неравенства негативно сказывается на благосостоянии и здоровье людей, а также на биосфере

АРХЕОЛОГИЯ

Иголка в стоге сена

Катерина Дука и Томас Хайем

Новый метод, позволяющий определить, кому принадлежали маленькие фрагменты ископаемых костей, помогает узнать, когда, где и как одни виды человека взаимодействовали с другими

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

64 Странное поведение

124

Рональд Хансон и Кристер Шальм

Угасла надежда на то, что квантовую перепутанность можно объяснить ошибочной трактовкой экспериментов

ГЕОЛОГИЯ

Скрытый ад

134

Шэннон Холл

74

Под Чили, возможно, зреет супервулкан с холодным нутром, что в корне меняет представление о механизмах запуска сильных извержений

МЕДИЦИНА

Путь из мира безмолвия

142

Дина Файн Марон

Достигнут долгожданный прогресс в лечении глухоты с помощью генной инженерии

ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Города-губки

152

Эрика Гиз

Восстановление естественных водных потоков в городах смягчит губительные последствия наводнений и засухи

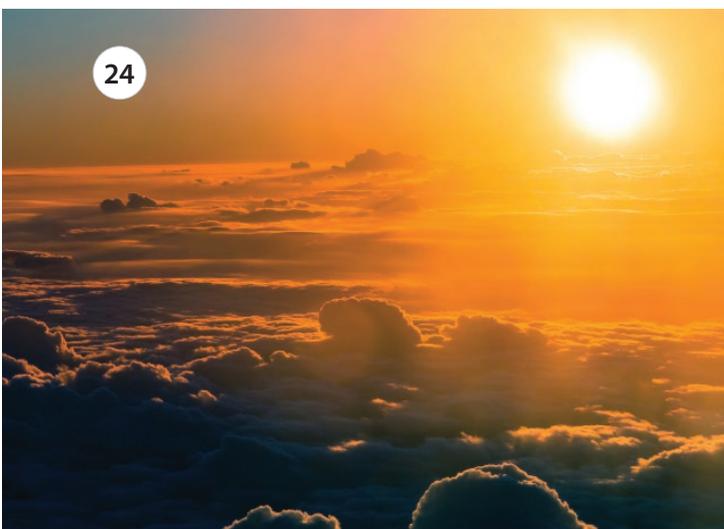
Разделы

От редакции

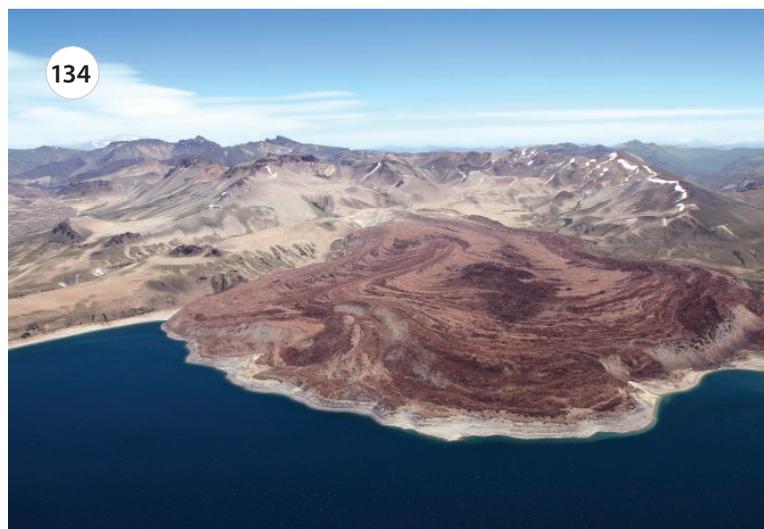
3

50, 100, 150 лет тому назад

123, 160



24



134

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Наши партнеры:



PETER



SERVICE



Сибирское отделение РАН



РОСАТОМ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



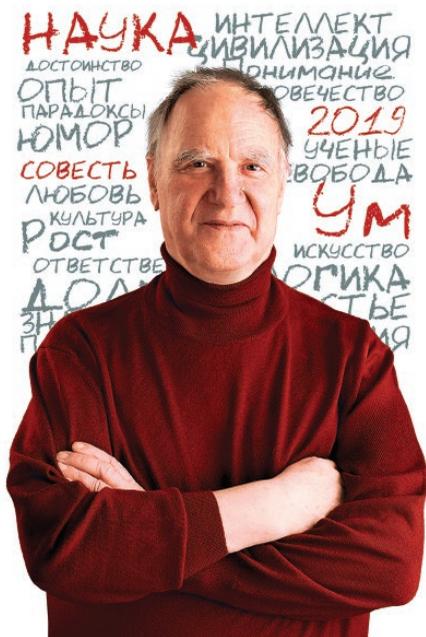
очевидное
невероятное



ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛ

Научная Россия

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



Учредитель и издатель:

Некоммерческое партнерство «Международное партнерство распространения научных знаний»

Главный редактор:

В.Е. Фортов

Главный научный консультант:

президент РАН акад. А.М. Сергеев

Ответственный секретарь:

О.Л. Беленицкая

Зав. отделом иностранных материалов:

А.Ю. Мостинская

Шеф-редактор иностранных материалов:

В.Д. Ардаматская

Зав. отделом российских материалов:

О.Л. Беленицкая

Выпускающий редактор:

М.А. Янушкевич

Обозреватели:

В.С. Губарев, В.Ю. Чумаков

Администратор редакции:

О.М. Горлова

Научные консультанты:

к.ф.-м.н. Т.Е. Григорьев; д.ф.-м.н. В.С. Махмутов; к.т.н. Д.А. Седнев; к.ф.-м.н. В.Г. Сурдин;
член-корр. РАН А.В. Шабунин

Над номером работали:

М.С. Багоцкая, А.П. Кузнецов, С.М. Левензон, Н.Л. Лескова, А.И. Прокопенко, В.И. Сидорова,
Н.Н. Шафрановская, С.Э. Шафрановский

Дизайнер:

Д.А. Гранков

Верстка:

А.Р. Гукасян

Корректур:

Я.Т. Лебедева

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

В.Е. Фортов

Директор НП «Международное партнерство распространения научных знаний»:

В.К. Рыбникова

Финансовый директор:

Л.И. Гапоненко

Главный бухгалтер:

Ю.В. Калинкина

Адрес редакции:

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

Отпечатано:

ОАО «Подольская фабрика офсетной печати»
142100, г. Подольск, Революционный проспект, д. 80/42

© 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.

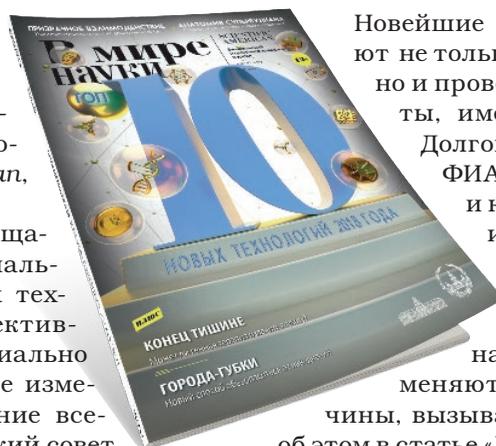
Техника, которая определит развитие мира

«Защитник индустрии и предпринимательства и журнал о механике и других новинках» — девиз, который был напечатан под логотипом первого номера журнала *Scientific American*, вышедшего 28 августа 1845 г.

В качестве ответа на это обещание журнал публикует специальный репортаж «Десять новых технологий 2018 года». Перспективная технология — это потенциально прорывное решение, способное изменить мироустройство. В течение всего года редакция, попечительский совет *Scientific American*, различные эксперты отбирали лучшие идеи. Итоги их работы представлены в американском контенте журнала.

В другом материале американской части журнала — «Странное поведение» — описано удивительное явление квантовой перепутанности, когда частицы могут сохранять между собой «призрачную» связь, даже если находятся далеко друг от друга. Описанный феномен решительным образом противоречит нашей привычной картине мира. Последние эксперименты подтвердили, что квантовую перепутанность нельзя объяснить ничем другим.

Разбросанные, не связанные друг с другом части — на этот раз окаменевших костей — проблема, обсуждаемая в статье американских ученых «Иголка в стоге сена». В Денисовой пещере на Алтае совокупность различных методов позволяет исследователям объяснить, когда, где и каким образом разные виды людей совместно существовали и взаимодействовали друг с другом.



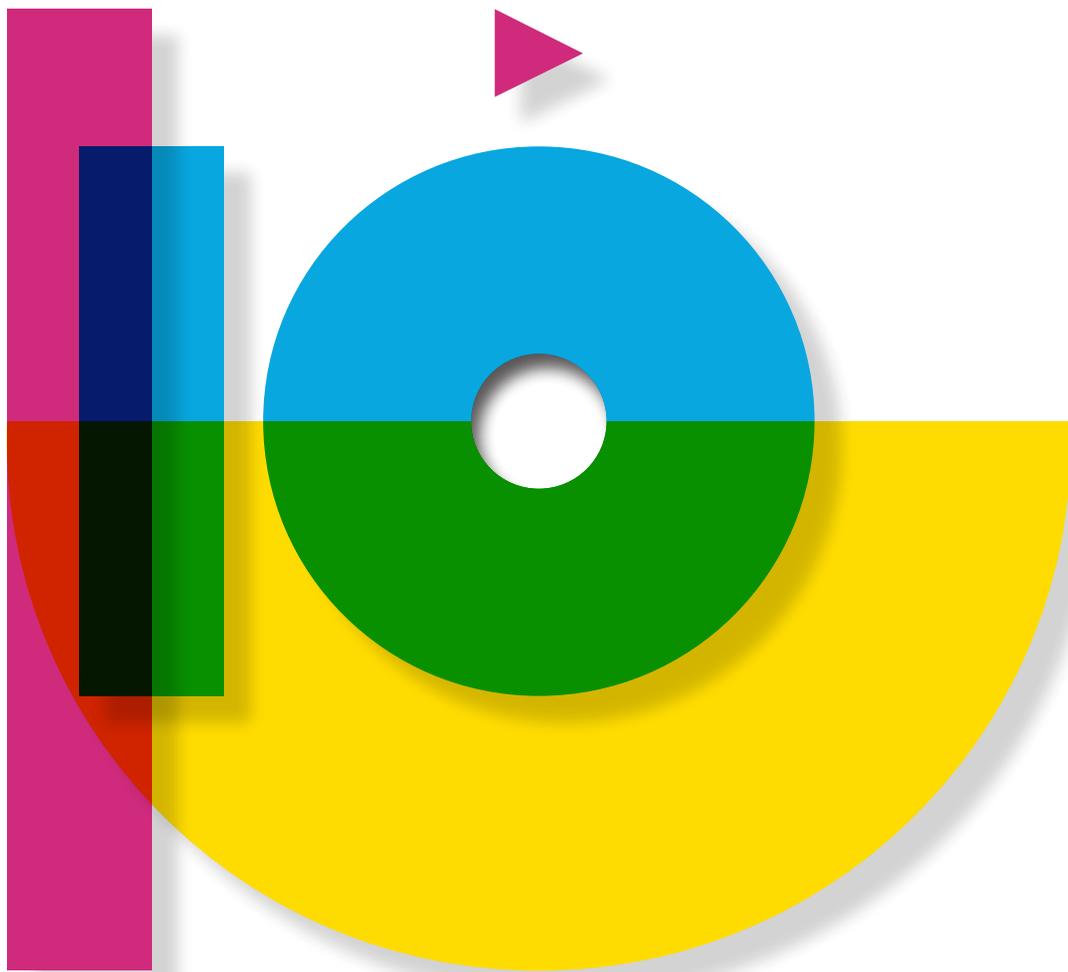
Новейшие методы исследования позволяют не только заглянуть далеко в прошлое, но и провести уникальные эксперименты, имеющие планетарное значение. Долгопрудненская научная станция ФИАН «Лаборатория физики Солнца и космических лучей» занимается изучением космических лучей и процессов их ядерных взаимодействий в атмосфере Земли, чтобы ответить на вопрос, насколько они стабильны, как они меняются со временем, каковы причины, вызывающие их модуляцию. Читайте об этом в статье «Дети Солнца».

Разработка «умных» биосовместимых материалов — одна из амбициозных задач, которую ставят в лаборатории полимерных материалов отдела нанобиоматериалов и структур Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий. Созданную в лаборатории конструкцию можно вставить в плевральную полость человека, чтобы помочь ему восстановиться после различных операций и заболеваний. Об этом — в статье «Биопломба на легкое».

Медицина — это сфера, успехи в которой отражаются на жизни каждого человека. Статья «Фабрика здоровья» посвящена Боткинской больнице — одной из самых известных в Москве. Ей более 100 лет, и сегодня сюда стремятся попасть все нуждающиеся в качественном лечении. О том, как больнице удастся долгие годы сохранять лидирующие позиции, рассказывает главный врач больницы член-корреспондент РАН А.В. Шабунин. ■

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





СПЕЦИАЛЬНЫЙ РЕПОРТАЖ

ДЕСЯТЬ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 2018 ГОДА

ПОНИМАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИЗОБРЕТЕНИЙ — И СВЯЗАННЫХ С НИМИ ПРОБЛЕМ — ПОМОЖЕТ ОБЩЕСТВУ ОПРЕДЕЛИТЬ, КАК ИЗВЛЕЧЬ ИЗ НИХ МАКСИМАЛЬНУЮ ПОЛЬЗУ

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Технологии искусственного интеллекта уже применяются для поиска новых лекарств и материалов, а также для усовершенствования современных цифровых помощников. В скором времени на картинку реального мира будут накладываться виртуальные изображения, а квантовые компьютеры догонят классические машины.
- Применение передовых методов диагностики увеличивает возможности прецизионной медицины. Имплантируемые клетки, производящие лекарства и ускользающие от обнаружения иммунной системой, а также методы терапии, основанные на электростимуляции нервов, могут улучшить лечение болезней.
- Решая сложные проблемы, стоящие перед обществом, ученые выращивают мясо из стволовых клеток, а их коллеги, занимающиеся изучением генных драйвов, разрабатывают правила, регулирующие использование этих меняющих виды инструментов. Управляемые светом наноматериалы могут резко повысить эффективность солнечных батарей.

Как технологии изменят вашу жизнь в ближайшем будущем?

Искусственный интеллект значительно ускорит разработку новых лекарств и материалов. Передовые средства диагностики сделают возможным развитие персонализированной медицины. Дополненная реальность будет повсюду: наложение информации и анимации на изображения реального мира поможет человеку в решении ежедневных задач и повысит эффективность производства. Если вы заболите, то врачи смогут имплантировать в ваш организм живые клетки, которые будут работать как фабрики по производству лекарств и лечить ваши недуги. На вашем столе появятся говядина, мясо птицы и рыба, выращенные из стволовых клеток, что позволит существенно снизить нагрузку на окружающую среду, связанную с разведением животных, а множество живых существ будут спасены от жестокого обращения.

Эти и другие меняющие мир идеи, вошедшие в перечень десяти новых технологий в этом году, были отобраны ведущими экспертами в области биологии, неорганической химии, робототехники и искусственного интеллекта. Этот список — результат интенсивного процесса отбора.

Сначала мы собрали рекомендации от новаторов, входящих в состав Глобальных советов Всемирного экономического форума (ВЭФ) по вопросам будущего и сетей экспертов, а также от экспертного совета и сотрудников редакции журнала *Scientific American* и других специалистов. Затем, в ходе виртуальных встреч, руководящая группа оценила, соответствуют ли кандидаты ряду критериев. Технологии должны принести значительную пользу обществу и экономике в ближайшие три-пять лет, они должны быть потенциально прорывными, способными произвести революцию в промышленности или определять новые способы действий. Кроме того, технологии должны находиться на относительно ранних стадиях разработки. Это означает, что изобретения еще не получили широкого распространения, но их изучают множество групп, они вызывают энтузиазм у экспертов, привлекают все больше инвестиций и в идеале разработкой таких технологий занимается более чем одна компания. Во время первого заседания руководящей группы первоначальный список, включавший свыше 50 предложений, сократили и было решено собрать дополнительную информацию об оставшихся 20 кандидатах. Окончательное решение было принято после рассмотрения дополнительной информации в ходе двух последующих обсуждений.

Мариэтт Ди Кристина и Бернард Мейерсон



ИНФОРМАТИКА

ДОПОЛНЕННАЯ РЕАЛЬНОСТЬ ПОВСЮДУ

МИР БУДЕТ ДОПОЛНЕН ЦИФРОВЫМИ ДАННЫМИ

Коринна Лэйтан и Эндрю Мэйнард

Виртуальная реальность погружает нас в выдуманную изолированную вселенную. Дополненная реальность — это, наоборот, наложение сгенерированной компьютером информации на реальные объекты в реальном времени. Когда вы надеваете или смотрите на устройство, снабженное программным обеспечением дополненной реальности и камерой, — наушники, «умные» очки, смартфон или планшет, — программа анализирует поступающий поток видеоданных, загружает подробную информацию о месте действия и накладывает на эту картинку актуальные данные, изображения или анимацию, часто в 3D.

В качестве примеров можно привести дисплеи, помогающие двигаться на машине задним ходом, и популярную игру *Pokémon GO*. Множество пользовательских приложений, в том числе те, что переводят дорожные знаки для приезжих иностранцев, дают студентам возможность препарировать виртуальных лягушек и позволяют покупателям еще до доставки увидеть, как будет выглядеть кресло в их гостиной, тоже используют технологию дополненной реальности. В будущем эта технология позволит посетителям музеев вызывать гидов, напоминающих голограммы; хирургам — визуализировать в 3D ткани пациента под покровом кожи; архитекторам и дизайнерам — по-новому сотрудничать при работе над проектами; операторам дронов — контролировать удаленных роботов, используя расширенную визуальную информацию; новичкам — быстро обучаться выполнению новых задач в различных областях, от медицины до обслуживания производств.

Поскольку ПО для разработки приложений простое в использовании, в ближайшие годы ассортимент пользовательских приложений должен расширяться. В настоящее время максимальный эффект от применения дополненной реальности наблюдается в промышленности. Эта технология становится неотъемлемой составляющей «Четвертой промышленной революции», или «Промышленности 4.0» — системного преобразования производства посредством интеграции физических и цифровых систем для повышения качества, снижения себестоимости и роста эффективности. Многие компании, например, тестируют



применение технологии дополненной реальности на линиях сборки. Программа дополненной реальности предоставляет точную информацию в тот же момент, когда возникает необходимость, — например, когда рабочий должен выбрать одну из двух деталей. Таким образом снижается количество ошибок, повышается эффективность и увеличивается производительность. Программа также может визуализировать нагрузки на оборудование и в реальном времени создавать изображения участков, где возникают проблемы.

Аналитики рынка, такие как *ABI Research*, *IDC* и *Digi-Capital*, считают, что технология дополненной реальности вскоре станет основным направлением. Они ожидают, что рынок технологий дополненной реальности, в настоящее время оцениваемый в \$1,5 млрд, вырастет до \$100 млрд к 2020 г. Крупнейшие технологические компании, включая *Apple*, *Google* и *Microsoft*, затрачивают огромные финансовые и человеческие ресурсы на разработку продуктов и приложений виртуальной и дополненной реальности. Венчурный капитал тоже привлекается в больших объемах: в 2017 г. в технологии виртуальной и дополненной реальности инвестировано \$3 млрд, причем половина от этой суммы поступила только в четвертом квартале года. *Harvard Business Review* недавно назвал дополненную реальность преобразующей технологией, которая повлияет на все сферы бизнеса.

Тем не менее трудности сохраняются. В настоящее время ограничения, связанные с аппаратным обеспечением и диапазонами рабочих частот для связи, препятствуют выводу технологии на уровень повседневного использования потребителями. Например, многие существующие музейные приложения и приложения для путешествий, использующие технологию дополненной реальности, надо предварительно загрузить, и даже в этом случае качество графики может не соответствовать ожиданиям пользователей. Но область применения технологии существенно расширится, когда станут доступны более дешевые и быстрые чипы для мобильных устройств, подготовленные для работы с дополненной реальностью, на рынке появятся более универсальные «умные» очки и диапазон рабочих частот будет расширен. Тогда дополненная реальность, так же как интернет и видео в режиме реального времени, станет неотъемлемой частью нашей повседневной жизни.

УЧАСТНИКИ РУКОВОДЯЩЕЙ ГРУППЫ ПО НОВЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Мариэтт Ди Кристина (Mariette DiChristina) — председатель руководящей группы, главный редактор журнала *Scientific American*, исполнительный вице-президент редакционно-издательского отдела журналов издательской группы *Springer Nature*. С 2014 по 2016 г. она была заместителем председателя Метасовета по новым технологиям — одного из Советов ВЭФ по глобальной повестке дня.

Бернард Мейерсон (Bernard S. Meyerson) — заместитель председателя руководящей группы, руководитель отдела инноваций в компании *IBM*, член Национальной инженерной академии США, обладатель ряда наград за работы в области физики, инженерии и бизнеса. В 2014–2016 гг. — председатель Метасовета ВЭФ по новым технологиям; в 2016–2018 гг. — председатель Глобального совета ВЭФ по вопросам будущего в области передовых материалов.

Хабива Алсафар (Habiba Alsafar) — доцент биомедицинской инженерии, директор Центра передового опыта в области биотехнологии в Университете Халифа. Ее работа связана с определением участков генома, ответственных за предрасположенность людей к заболеваниям, наиболее распространенным в ОАЭ. В 2016–2018 гг. Хабива работала в составе Глобального совета ВЭФ по вопросам будущего в области биотехнологий.

Алан Аспуру-Гузик (Alan Aspuru-Guzik) — профессор химии и информатики в Университете Торонто и сотрудник Института искусственного интеллекта «Вектор»; соучредитель *Zapata Computing* и *Keobotix*, а также программы к 150-летию Канады «Канадские исследователи в области теоретической и квантовой химии». В 2016–2018 гг. он принимал участие в Глобальном совете ВЭФ по вопросам будущего в области передовых материалов.

Джефф Карбек (Jeff Carbeck) — основатель нескольких компаний, генеральный директор краудсорсинговой компании *10Q5*, работал в Глобальном совете ВЭФ по вопросам будущего в области передовых материалов.

Рона Чандравати (Rona Chandrawati) — старший преподаватель и глава лаборатории «Нанотехнология для продовольствия и медицины» в Университете Нового Южного Уэльса в Австралии; занимается разработкой биотехнологических материалов для сенсоров и доставки лекарств. Рона — одна из 50 ученых в возрасте

до 40 лет, вошедших в «Сообщество молодых ученых ВЭФ» в 2018 г., член Сети экспертов ВЭФ.

Синтия Коллинз (Cynthia H. Collins) — доцент химической и биологической инженерии в Политехническом институте Ренселера; использует междисциплинарный подход, от синтетической биологии и геномики микроорганизмов до больших данных, для изучения различных микробиомов и придания микроорганизмам полезных свойств с помощью инженерии. Синтия вошла в число «Молодых ученых ВЭФ-2016» и в 2016–2018 гг. работала в составе Глобального совета ВЭФ по вопросам будущего в области биотехнологий.

Сет Флетчер (Seth Fletcher) — руководитель отдела редакции журнала *Scientific American*

Хавьер Гарсия Мартинес (Javier Garcia Martinez) — профессор неорганической химии и руководитель Лаборатории молекулярной нанотехнологии Университета Аликанте в Испании; сооснователь компании *Rive Technology* (дочерняя компания Массачусетского технологического института, налаживающая серийный выпуск для химической промышленности катализаторов из наноматериалов). Хавьер — член исполнительного комитета ИЮПАК, входит в список «Молодые мировые лидеры» ВЭФ и в состав Сети экспертов ВЭФ. Автор множества публикаций о наноматериалах, катализаторах и энергетике.

Хироаки Китано (Hiroaki Kitano) — эксперт по искусственному интеллекту и системной биологии, президент и исполнительный директор *Sony Computer Science Laboratories* и глава Института системной биологии в Токио. В 2017–2018 гг. работал в нескольких Глобальных советах ВЭФ по вопросам будущего, в том числе в Совете по искусственному интеллекту и робототехнике.

Коринна Лэйтан (Corinna E. Lathan) — сооснователь и генеральный директор *AnthroTroxix*, научно-исследовательской компании в области биомедицинской инженерии, которая занимается созданием продуктов в сфере цифровой медицины, переносных устройств, робототехники и технологий дополненной реальности; член совета директоров *RTC*, компании-провайдера интернета вещей и платформ дополненной реальности. Лэйтан входит в список «Молодые мировые лидеры» и «Пионер технологий» ВЭФ и в 2016–2018 гг. была

председателем Глобального совета ВЭФ по вопросам будущего в области расширения возможностей человека.

Джеффри Лин (Geoffrey Ling) — полковник армии США в отставке, профессор неврологии Военно-медицинского университета и Университета Джона Хопкинса; эксперт в области разработок технологий и перехода к промышленному производству. Занимал руководящие должности в Агентстве передовых оборонных исследовательских проектов и в Управлении по научно-технической политике Белого дома, входил в состав Совета ВЭФ по нейротехнологиям (2016–2018).

Эндрю Мэйнард (Andrew Maunard) — профессор Школы «будущее инноваций в обществе» Университета штата Аризона, автор готовящейся к выходу книги «Кино из будущего: технология и мораль научно-фантастических фильмов» (*Films from the Future: The Technology and Morality of Sci-Fi Movies*). Его работа посвящена проблемам ответственного подхода к разработке и использованию новых технологий. Эндрю входил в состав Глобального совета ВЭФ по вопросам будущего в области технологии, ценности и политики (2016–2018).

Элизабет О’Дэй (Elizabeth O’Day) — основатель и генеральный директор *Olaris Therapeutics*, компании в области прецизионной медицины, расположенной в Кеймбридже, штат Массачусетс; бывший член Глобального совета ВЭФ по вопросам будущего в области биотехнологий (2016–2018). О’Дэй — основатель компаний *Lizard Fashion* и *Proyecto Chispa*, программы «Женщины в науке и технологиях» и сети *PHiS*.

Сан Юп Ли (Sang Yup Lee) — почетный профессор химической и биомолекулярной инженерии Корейского института науки и технологий (KAIST), ректор институтов KAIST; в 2016–2018 гг. — председатель Глобального совета ВЭФ по вопросам будущего в области биотехнологий; обладатель более 630 патентов.

ПРИГЛАШЕННЫЙ АВТОР Оуэн Шефер (G. Owen Schaefer) — старший научный сотрудник, доцент Центра биомедицинской этики в Медицинской школе им. Юн Лу Линя Национального университета Сингапура; занимается проблемами этики, связанными с разработкой новых биотехнологий. В 2016–2018 гг. входил в состав Глобального совета ВЭФ по вопросам будущего в области технологий, ценности и политики.



МЕДИЦИНА

ЭЛЕКТРО- СТИМУЛЯТОРЫ

ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИЯ НЕРВОВ
МОЖЕТ ЗАМЕНИТЬ ЛЕКАРСТВА ПРИ
ЛЕЧЕНИИ МНОЖЕСТВА ХРОНИЧЕСКИХ
ЗАБОЛЕВАНИЙ

Джеффри Лин и Коринна Лэйтан

Электростимуляторы — приборы для лечения заболеваний импульсами электрического тока — давно используются в медицине. Вспомните об электрокардиостимуляторах, кохлеарных имплантах и электростимуляции глубоких структур мозга при болезни Паркинсона. Один из таких методов может стать универсальным, значительно улучшив качество лечения целого ряда заболеваний. Этот метод связан с передачей сигналов блуждающему нерву, по которому импульсы от ствола мозга поступают к большинству органов и обратно.

Новое применение стимуляции блуждающего нерва (VNS, *vagal nerve stimulation*) стало возможным отчасти благодаря исследованию Кевина Трэси (Kevin Tracey) из Файнштейнского института медицинских исследований и других ученых, показавших, что блуждающий нерв выделяет химические вещества, участвующие в регуляции деятельности иммунной системы. Выделение специфического нейромедиатора в селезенке, например, подавляет иммунные клетки, участвующие в развитии воспаления во всем организме. Проведенные исследования показали, что VNS-терапия может оказаться полезной не только при расстройствах, характеризующихся нарушением проводимости импульсов, но и при аутоиммунных и воспалительных заболеваниях. Она может стать благом для пациентов с подобными заболеваниями, потому что существующие лекарства часто оказываются неэффективными или вызывают серьезные побочные эффекты. Возможно, VNS-терапия будет легче переноситься, поскольку воздействие осуществляется на определенный нерв, тогда как лекарства могут действовать и на другие ткани организма помимо тканей-мишеней.

Проведенные до настоящего времени исследования, касающиеся возможностей применения электростимуляции для лечения воспаления, вдохновляют. В ходе первых клинических испытаний была доказана безопасность устройств VNS, разработанных компанией *SetPoint Medical* (соучредителем которой стал Трэси), для терапии ревматоидного артрита, вызывающего болезненное воспаление и изменения в суставах, а также болезни Крона, для которой характерно воспаление желудочно-кишечного тракта. Сейчас проводятся дополнительные испытания. Рассматривается также возможность применения электростимуляции для лечения других болезней, в которых присутствует воспалительный компонент, таких как заболевания сердечно-сосудистой системы, нарушение регуляции метаболизма и деменция, а также аутоиммунных заболеваний, таких как

системная красная волчанка, при которой снижается активность самого блуждающего нерва. Еще один возможный вариант применения — предотвращение отторжения пересаженных тканей иммунной системой.

Большинство стимуляторов блуждающего нерва, в том числе устройства, разработанные *SetPoint*, и те, что уже используются для лечения эпилепсии и депрессии, представляют собой импланты. Хирурги обычно помещают устройство под кожу в области грудной клетки ниже ключицы. Проводки от импланта обвивают одну ветвь блуждающего нерва и передают электрические импульсы с заданным интервалом; частоту и другие настройки программируют через внешнее устройство. Диаметр современных имплантов равен примерно 3,8 см, но ожидается, что со временем появятся более тонко настраиваемые стимуляторы меньшего размера.

Недавно Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA) США также разрешило применение неинвазивных портативных стимуляторов блуждающего нерва, предназначенных для снижения остроты приступов кластерных головных болей и мигреней, хотя механизмы такого действия неясны. Портативные устройства осуществляют слабую электрическую стимуляцию нерва через кожу на шее или через ухо.

Новые методы электростимуляции могут применяться не только по отношению к блуждающему нерву. В конце 2017 г. FDA одобрило неимплантируемое устройство, которое облегчает абстинентное состояние, вызванное употреблением опиоидов, за счет стимуляции ветвей черепного и зрительного нервов через кожу за ухом. Устройство получило разрешение FDA после того, как у 73 пациентов, страдавших от абстиненции, связанной с употреблением опиоидов, отмечалось снижение остроты симптомов на 31% и больше.

Стоимость имплантов и операции по их установке может препятствовать широкому применению VNS-терапии, хотя эта проблема будет стоять не так остро, когда технология станет менее инвазивной. Но цена — не единственная проблема. Исследователи должны больше узнать о механизмах действия VNS при каждом заболевании,

Недавно FDA разрешило применение неинвазивных портативных стимуляторов блуждающего нерва для снижения остроты приступов кластерных головных болей и мигреней, хотя механизмы такого действия неясны

а также понять, как лучше всего устанавливать оптимальные параметры стимуляции для каждого пациента. Возможно также, что импульсы, мишенью которых становится блуждающий нерв, могут оказывать нежелательное воздействие на окружающие нервы.

Тем не менее все большее число исследований и клинических испытаний посвящено изучению механизмов действия и эффектов VNS и других электростимуляторов. Поэтому возможно, что в конечном итоге такие приборы будут лучше справляться с широким спектром хронических заболеваний, избавив миллионы пациентов от необходимости принимать лекарства.





молодых компаний, включая *Mosa Meat*, *Memphis Meats*, *SuperMeat* и *Filness Foods*, занимаются разработкой методов получения в лаборатории говядины, свинины, морепродуктов и мяса домашней птицы, и эта область исследований привлекает миллионы долларов инвестиций. Так, в 2017 г. *Memphis Meats* получили \$17 млн от инвесторов, в числе которых были Билл Гейтс и сельскохозяйственная компания *Cargill*.

Если бы производство мяса (его также называют «чистым») в лабораторных условиях получило широкое распространение, это позволило бы исключить неэтичное, жестокое обращение с животными, которых разводят для получения продуктов питания, а также снизить нагрузку на окружающую среду, связанную с производством мясной продукции. В данном случае требуются ресурсы только для получения и поддержания культуры клеток, а не целого организма с самого рождения.

Сначала у животного берут образец мышечной ткани, потом из нее извлекают стволовые клетки, многократно размножают и дают им возможность дифференцироваться в простые мышечные волокна, которые затем увеличиваются в размерах и формируют мышечную ткань. В *Mosa Meat* утверждают, что из одного образца мышечной ткани коровы можно получить мясо в количестве, достаточном для приготовления 80 тыс. гамбургеров весом 110 г.

Ряд новых компаний заявляет, что в течение ближайших нескольких лет они ожидают получить продукцию для продажи. Но чтобы удержаться на рынке, «чистому» мясу придется преодолеть целый ряд барьеров.

Два из них — это цена и вкус.

В 2013 г., когда бургер с мясом, произведенным в лаборатории, представили журналистам, на производство котлеты было затрачено более \$300 тыс. И она была чрезмерно сухой, так как содержала слишком мало жира. С той поры расходы на производство упали. Компания *Memphis Meats* в этом году сообщила, что гамбургер с фаршем из мяса их производства стоит около \$600. С учетом существующей тенденции через несколько лет «чистое» мясо составит конкуренцию традиционно получаемому продукту. Тщательный подбор текстур и разумное введение добавок могут решить проблемы, связанные со вкусом мяса.

Чтобы продукция вышла на рынок, необходимо доказать, что «чистое» мясо безопасно для употребления. Хотя нет оснований полагать, что выращенное в лабораторных условиях способно нанести вред здоровью, FDA только начинает рассматривать вопросы регулирования такой продукции. Тем временем производители обычного мяса протестуют, заявляя, что произведенные в лаборатории продукты — это не мясо, а потому их нельзя маркировать подобным образом. Опросы показывают, что общество слабо заинтересовано в употреблении мяса, выращенного в лабораториях. Но несмотря на существующие вызовы, компании по производству «чистого» мяса уверенно двигаются вперед. Если им удастся получить доступные по цене продукты с аутентичным вкусом, то включение «чистого» мяса в наш ежедневный рацион могло бы снять ряд этических вопросов и сохранить окружающую среду.



ХИМИЯ

МЯСО ИЗ СТВОЛОВЫХ КЛЕТОК

ГОВЯДИНА НА УЖИН — БЕЗ УНИЧТОЖЕНИЯ ЖИВОТНЫХ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Оуэн Шефер

Представьте, что вы едите бургер с сочной говядиной, которую получили, не уничтожая животных. Выращивание мяса в лаборатории в культуре клеток превращает это видение в реальность. Несколько



ИНФОРМАТИКА

ПРОДВИНУТЫЕ СЕТЕВЫЕ РОБОТЫ

НОВЫЕ АЛГОРИТМЫ ПОЗВОЛЯТ ПЕРСОНАЛЬНЫМ УСТРОЙСТВАМ ИЗУЧИТЬ ЛЮБОЙ ВОПРОС НАСТОЛЬКО, ЧТО ОНИ СМОГУТ ДИСКУТИРОВАТЬ НА ЭТУ ТЕМУ

Бернард Мейерсон

Современных цифровых помощников уже иногда можно ошибочно принять за человека, однако на подходе намного более способные сетевые роботы. Невидимые *Siri*, *Alexa* и им подобные системы используют сложные программы распознавания речи, чтобы разобраться, в чем состоит запрос и как его выполнить, и генерируют естественно звучащую речь для передачи заданных сценарием ответов, соответствующих вашим вопросам.

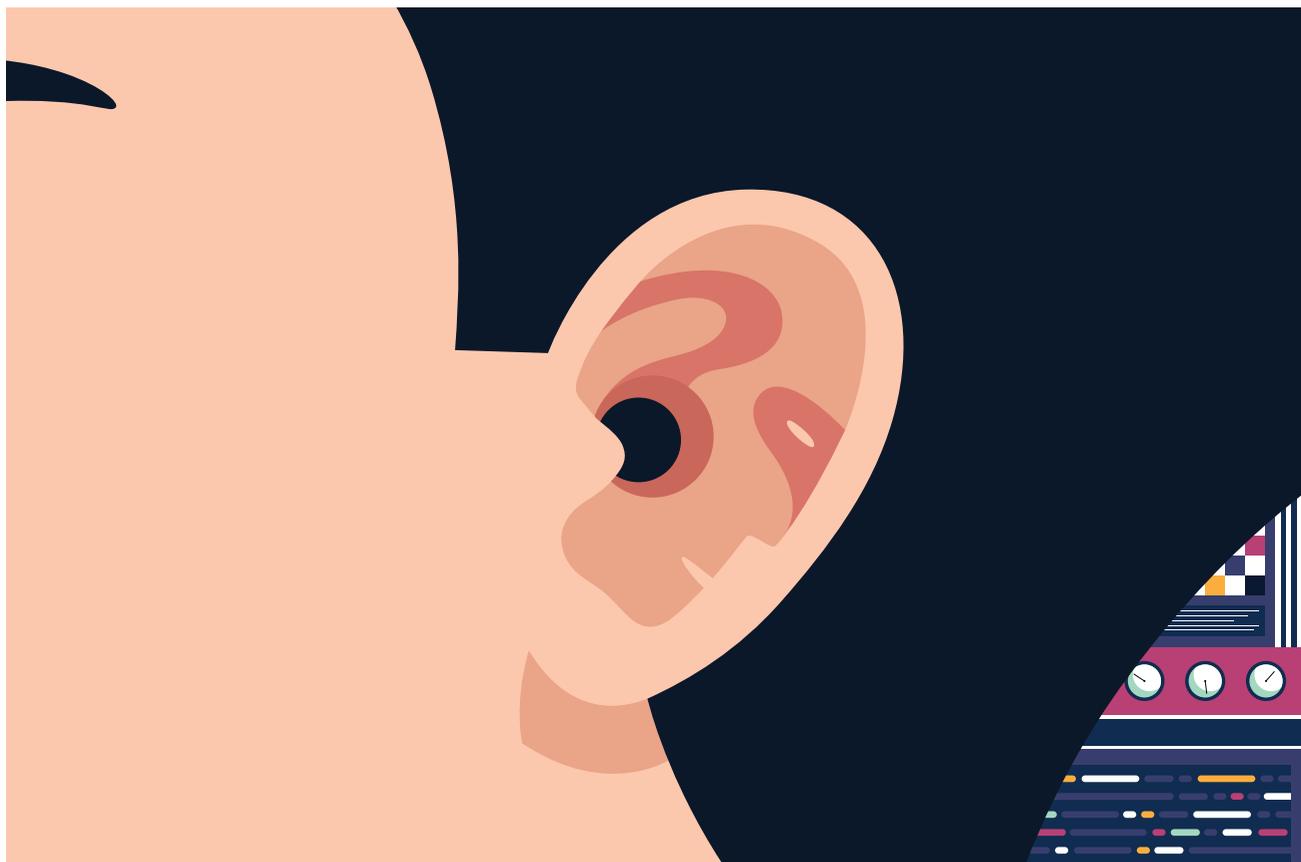
Такие системы сначала необходимо «обучить», то есть представить огромное количество примеров возможных вариантов запросов, поступающих от людей, а подходящие ответы должны быть записаны человеком и представлены в формате высокоструктурированных данных.

Эта работа требует больших затрат времени, а диапазон задач, которые в результате могут выполнять цифровые помощники, ограничен. Системы могут «учиться»: благодаря машинному обучению их способность сопоставлять входящие запросы с существующими ответами улучшается — но до некоторого предела. Тем не менее такие системы впечатляют.

В настоящее время разрабатываются еще более сложные технологии, позволяющие следующему поколению подобных систем извлекать и систематизировать неструктурированные данные (необработанные тексты, видео, фотографии, аудио, электронную почту и т.д.) из миллионов источников и затем самостоятельно давать исчерпывающие рекомендации или обсуждать с оппонентом темы, которые не затрагивались при обучении.

Некоторое представление о возможностях таких технологий дают веб-сайты, где используются чат-боты, способные немедленно дать голосовой ответ на вопросы, обращаясь к обширным массивам данных, применявшимся для обучения. Таким чат-ботам почти не нужна подготовка по конкретным темам или запросам: они используют комбинацию предварительно сконфигурированных данных и постоянно развивающуюся способность «читать» поступающие актуальные справочные материалы. Тем не менее прежде чем эти системы смогут давать очень точные ответы, они сначала должны научиться распознавать слова и их значения.

В июне этого года компания *IBM*, где я работаю, представила усовершенствованный вариант этой технологии: систему, вступающую в дискуссию в реальном времени



с человеком-экспертом без предварительного обучения предмету спора или обсуждаемой теме. Используя неструктурированные данные (в том числе статьи из «Википедии», часть из которых была отредактирована для внесения ясности), система должна была установить актуальность и достоверность информации и организовать ее в виде ресурсов многократного использования, к которым программа могла обратиться, чтобы последовательно аргументировать занимаемую позицию. Программа также должна была отвечать на доводы, приводимые человеком-оппонентом. Во время демонстрации система участвовала в двух обсуждениях, и большинство зрителей посчитали, что в одной из дискуссий машина оказалась более убедительна, чем человек.

Эффективная технология, включающая ПО, которое может не только понимать естественный язык, но и справляться с более сложной задачей — определять позитивные и негативные эмоции, — разрабатывалась более пяти лет, и работа все еще продолжается. Тем не менее победа системы искусственного интеллекта без предварительной подготовки над признанным экспертом — человеком открывает двери для бесчисленного числа аналогичных приложений, которые могут появиться через три-пять лет, если не раньше. Подобные системы, например, могли бы помочь врачам быстро находить актуальные исследования, касающиеся сложных случаев заболеваний, и обсуждать достоинства протокола лечения.

Такие интеллектуальные системы будут полезны только для сбора имеющихся сведений, а не для создания новых, как это делают ученые или эксперты. Однако с появлением более умных машин возникает угроза потери рабочих мест. Поэтому общество должно позаботиться о том, чтобы следующее поколение получило квалификацию, необходимую для решения проблем, требующих человеческой изобретательности.



БИОТЕХНОЛОГИЯ

ИМПЛАНТИРУЕМЫЕ КЛЕТКИ, ПРОИЗВОДЯЩИЕ ЛЕКАРСТВА

ЛЕКАРСТВА МОГУТ СЕКРЕТИРОВАТЬСЯ В ОРГАНИЗМЕ ПО МЕРЕ НЕОБХОДИМОСТИ, НЕ ОТТОРГАЯСЯ ИММУННОЙ СИСТЕМОЙ

Сан Юн Лу

Множество людей, больных диабетом, по несколько раз в день прокалывают пальцы для проведения экспресс-анализа уровня сахара в крови и определения необходимой дозы инсулина. После имплантации клеток поджелудочной железы, секретирующих

в организме инсулин (клеток островков Лангерганса), этот громоздкий процесс мог бы стать необязательным. Таким же образом вживление клеток могло бы трансформировать методы лечения других заболеваний, в том числе рака, сердечной недостаточности, гемофилии, глаукомы и болезни Паркинсона. Однако клеточные импланты имеют большой недостаток: реципиенты должны постоянно принимать иммуносупрессоры, чтобы предотвратить отторжение этих клеток иммунной системой. Прием таких лекарств может привести к серьезным побочным эффектам, включая повышенный риск возникновения инфекций или злокачественных опухолей.

В течение нескольких десятилетий ученые занимаются разработкой способов, позволяющих поместить клетки в полупроницаемые мембраны, препятствующие атакам иммунной системы на вживляемые клетки. Такие капсулы позволяют питательным веществам и другим малым молекулам проникать внутрь, а необходимым гормонам или другим лекарственным белкам — наружу. Но недостаточно предотвратить повреждение самих клеток: если иммунная система будет рассматривать защитный материал как чужеродный, это приведет к разрастанию волокнистой соединительной ткани поверх капсул. Такие «фиброзы» будут препятствовать поступлению питательных веществ в клетки, вызывая их гибель.

Сейчас исследователи начинают решать проблему фиброзов. Например, в 2016 г. команда из Массачусетского технологического института (МТИ) опубликовала информацию о методе, позволяющем сделать импланты невидимыми для иммунной системы. После проверки огромного количества произведенных в лаборатории материалов исследователи остановились на геле на основе химически модифицированной версии альгината, имеющего долгую историю безопасности для организма применения. Когда ученые имплантировали островковые клетки, помещенные в капсулу из такого геля, в организм большой диабетом мыши, клетки в ответ на изменение уровня сахара в крови сразу же начали производить инсулин и удерживали уровень сахара под контролем в течение всего исследования, длившегося шесть месяцев. Фиброз при этом не наблюдался. По результатам отдельной работы исследователи сообщили, что блокировка определенной молекулы (рецептора колониестимулирующего фактора-1) макрофагов — клеток иммунной системы, играющих важную роль в развитии фиброза, — может подавлять формирование фиброзной ткани. Добавление такого блокатора должно повысить «жизнеспособность» имплантов.

Разработкой терапии с использованием инкапсулированных клеток занимаются несколько вновь созданных компаний. Одна из таких компаний, *Sigilon Therapeutics*, на основе технологии, созданной в МТИ, работает над созданием средств для лечения диабета (эта работа ведется совместно с фармацевтической компанией *Eli Lilly*), гемофилии, а также группы нарушений обмена веществ под названием «лизосомные болезни накопления». Компания *Semma Therapeutics* тоже разрабатывает средство от диабета, но использует собственную технологию; *Neurotech Pharmaceuticals* проводит клинические испытания имплантов для лечения глаукомы и различных нарушений зрения, связанных с дистрофией сетчатки; *Living Cell Technologies* проводит клинические испытания имплантов для лечения болезни Паркинсона и разрабатывает средства терапии других нейродегенеративных заболеваний.

В настоящее время помещаемые в капсулы клетки извлекают из трупов животных и людей или получают из стволовых клеток. Возможно, когда-нибудь для терапии с помощью имплантируемых клеток будет использоваться более широкий диапазон типов клеток, в том числе спроектированных с использованием методов синтетической биологии — перепрограммирования генетического материала клетки для выполнения новых функций, таких как регулируемый выброс в ткань молекул определенного лекарства по требованию. Но сейчас об этом говорить слишком рано. Ни безопасность, ни эффективность терапии с использованием инкапсулированных клеток пока не доказаны в масштабных клинических испытаниях, но имеются обнадеживающие признаки.



ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

ИИ ДЛЯ БЫСТРОЙ РАЗРАБОТКИ МОЛЕКУЛ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ УСКОРЯЕТ ПОИСК НОВЫХ ЛЕКАРСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Джефф Карбек

Хотите разработать новый материал для получения солнечной энергии, лекарство для борьбы с раком или компонент, предотвращающий заражение зерновых вирусом? Сначала вы должны решить две проблемы: установить подходящее химическое строение вещества и определить, в результате каких химических реакций соответствующие атомы формируют нужные молекулы или их комбинации.

Обычно решения находят путем построения сложных умозаключений, порой удачных. Процесс занимает долгое время и связан с большим количеством неудачных попыток. Например, план синтеза может включать сотни отдельных этапов, многие из которых могут привести к нежелательным побочным реакциям или продуктам или вообще не будут работать. Однако сейчас использование систем искусственного интеллекта постепенно повышает эффективность и разработки, и синтеза, в связи с чем процесс поиска становится быстрее, легче и дешевле, а количество химических отходов сокращается.

В системах ИИ алгоритмы машинного обучения анализируют все известные эксперименты, в ходе которых предпринимались попытки обнаружить и синтезировать интересующее вещество, как удачные, так и, что важно, неудачные. Основываясь на обнаруженных закономерностях, алгоритмы предсказывают строение потенциально полезных новых молекул и возможные способы их производства. Не существует какого-то одного средства, использующего алгоритмы машинного обучения, которое может выполнить все эти действия по нажатию кнопки, но технологии ИИ все активнее используются при разработке молекул лекарств и материалов.

Например, система ИИ, разработанная исследователями из Мюнстерского университета, последовательно моделирует 12,4 млн известных одноступенчатых реакций и предлагает путь многоступенчатого синтеза, разрабатывая его в 30 раз быстрее человека.

В фармацевтике используется интересная технология на базе ИИ под названием «генеративная модель машинного обучения». Большинство фармацевтических компаний хранят миллионы химических веществ и изучают возможности их применения в качестве новых лекарств. Но даже с привлечением роботов и средств автоматизации лабораторий процесс изучения продвигается медленно и относительно редко приносит успехи. Кроме того, все «библиотеки» содержат лишь малую часть от более чем 10^{30} теоретически возможных молекул. Используя набор данных, описывающих химическое строение известных лекарственных препаратов (и кандидатов в лекарства) и их

свойства, инструменты машинного обучения могут сконструировать виртуальные библиотеки новых веществ с похожими и более полезными свойствами. Эта возможность используется для ускорения идентификации ведущих лекарств.

Примерно 100 новых компаний, включая *Incilico Medicine*, *Kebotix* и *BenevolentAI*, уже задействуют возможности ИИ для обнаружения лекарств. Недавно компания *BenevolentAI* увеличила до \$115 млн финансирование проектов по поиску лекарственных средств от болезни двигательного нейрона, болезни Паркинсона и других заболеваний, с трудом поддающихся лечению, с использованием ИИ. Компания подключает ИИ на всех этапах разработки лекарств: от открытия новых молекул до создания и клинических испытаний на безопасность и эффективность.

В сфере разработки материалов фирмы, такие как *Citrine Informatics*, применяют те же методы, что и производители лекарств, и сотрудничают с крупными компаниями, включая *BASF* и *Panasonic*, для ускорения внедрения новшеств. Правительство США также поддерживает разработку новых материалов с использованием ИИ. С 2011 г. государство инвестировало более \$250 млн. в *Materials Genome Initiative (MGI)*, Инициатива «Геном материала», в рамках которой создается инфраструктура, включающая ИИ и другие компьютерные методы, для ускорения разработки материалов с улучшенными свойствами.

Прошлый опыт показывает, что новые материалы и химические вещества могут представлять непредвиденный риск для здоровья и безопасности. К счастью, задействование ИИ должно дать возможность предсказать и уменьшить эти нежелательные эффекты. Похоже, эта технология может значительно увеличить скорость и эффективность разработки и вывода на рынок новых веществ и материалов, которые способны принести большую пользу: повысить качество здравоохранения и сельского хозяйства, а также способствовать сохранению ресурсов и увеличению производства и накопления возобновляемой энергии.



МЕДИЦИНА

ПЕРЕДОВАЯ ДИАГНОСТИКА ДЛЯ ТОЧНОЙ МЕДИЦИНЫ

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ МОЖЕТ ПОЛОЖИТЬ КОНЕЦ ШАБЛОННОМУ ПОДХОДУ К ЛЕЧЕНИЮ

Хабиба Альсафар и Элизабет О'Дэй

На протяжении почти всего XX в. женщин, больных раком молочной железы, лечили одинаково. С тех пор подход к лечению стал более индивидуальным: рак молочной железы подразделяют на подтипы и лечат соответственно. Например, многие женщины, у которых клетки опухоли содержат рецепторы эстрогенов, наряду со стандартной постоперационной химиотерапией могут

принимать лекарства, действующие именно на такие рецепторы. В 2018 г. исследователи сделали еще один шаг к персонализированному лечению. Они идентифицировали значительную часть больных, опухоли которых обладают свойствами, указывающими, что таким пациентам можно безопасно отказаться от химиотерапии и избежать часто возникающих серьезных побочных эффектов.

Достижения в развитии средств и методов диагностики многих заболеваний ускоряют переход к персонализированной, или прецизионной, медицине. Такие технологии могут помочь врачам идентифицировать и количественно определять множество биомаркеров (молекул, которые указывают на наличие нарушений), чтобы разделить пациентов на подгруппы по их предрасположенности к заболеванию, прогнозам развития болезни или вероятности ответа на конкретный способ лечения.

Первые методы диагностики были основаны на определении одного вида молекул, например глюкозы в случае диабета. Однако за последнее десятилетие большой прогресс достигнут в методах наук, названия которых оканчиваются на «-омика»: можно быстро, надежно и дешево секвенировать геном целого организма, или определить уровни всех белков (протеом), продуктов обмена веществ (метаболом) или микроорганизмов (микробиом) в образцах жидкостей или тканей. В результате рутинного использования этих методов появилось огромное количество массивов данных, которые может обрабатывать ИИ для поиска новых биомаркеров, полезных в клинической практике. Подобное сочетание искусственного интеллекта и высокопроизводительных «омик-методов» открывает новую эру в прогрессивной диагностике, которая трансформирует понимание и лечение множества болезней, так как даст врачам возможность подбирать лечение в соответствии с молекулярным профилем каждого пациента.

Несколько прогрессивных методов диагностики уже используются в онкологии. С помощью теста под названием *Oncotype DX* («Онкотип DX»), в рамках которого анализируется 21 ген, удалось обнаружить, что многие женщины, больные раком груди, могут избежать химиотерапии. Другой тест, *FoundationOne CDx*, позволяет выявить мутации в более чем 300 генах в солидных опухолях и определить специальные воздействующие на ген (таргетные) лекарства, которые, возможно, подойдут данному пациенту.

Еще один удивительный метод применяется для диагностики эндометриоза — заболевания, часто сопровождающегося болями, при котором за пределами матки разрастается ткань, подобная эндометрию. Для постановки диагноза обычно требуется операция. Разработанный *DotLabs* новый неинвазивный метод может определить наличие эндометриоза на основе анализа микроРНК в слюне. Разрабатываются методы анализа крови, которые помогут диагностировать мозговые нарушения, такие как аутизм, болезни Паркинсона и Альцгеймера, пока же врачи ставят диагноз по результатам субъективных оценок. Ученые даже выясняют, можно ли по результатам секвенирования всего генома, анализа микробиома и определения уровня сотен белков и метаболитов здорового человека разработать для него персональное руководство по предотвращению заболеваний.

Одно предупреждение: исследователи, использующие такие методы диагностики и медицинское оборудование, должны строго соблюдать меры безопасности для защиты частной жизни пациента. Более того, необходимы ясные нормативные рекомендации для последовательной оценки значения биомаркера в качестве диагностического инструмента. Такие рекомендации ускоряют внедрение новых биомаркеров в медицинскую практику.

Тем не менее уже сейчас прогрессивные методы диагностики начинают менять стандартный подход к постановке диагноза и лечению болезни. Использование таких методов позволит применять наиболее эффективный для данного пациента способ лечения и, возможно, даже снизить расходы на здравоохранение. Может быть, однажды у многих из нас появится персональное облачное хранилище накапливаемых со временем данных по биомаркерам, и необходимому для лечения информации можно будет получить, где бы мы ни обратились за медицинской помощью.



БИОТЕХНОЛОГИЯ

МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ГЕННОГО ДРАЙВА

ОГРАНИЧЕНИЕ РИСКА, СВЯЗАННОГО С ТЕХНОЛОГИЕЙ, СПОСОБНОЙ МЕНЯТЬ ЦЕЛЫЕ ВИДЫ

Синтия Коллинз

Область исследований, связанная с технологией геномной инженерии, которая может навсегда изменить фенотипы (признаки) в популяции или даже весь вид, быстро развивается. Речь идет об использовании генных драйвов — элементов генома, передающихся от родителей необычно большому числу потомков и поэтому довольно быстро распространяющихся в популяции. Генные драйвы встречаются в природе, но их также можно сконструировать, и это во многих отношениях может стать благом для человечества. С помощью этой технологии можно остановить распространение насекомыми возбудителей малярии и других ужасных инфекций; повысить урожай зерновых, изменив вредителей растений; сделать кораллы устойчивыми к экологическому стрессу и предотвратить разрушение экосистем инвазивными видами растений и животных. При этом ученые отчетливо осознают, что изменение или даже уничтожение видов может иметь серьезные последствия. Поэтому они разрабатывают правила, регулирующие переход от исследований в лаборатории к проведению полевых испытаний и более широкому использованию в будущем.

Десятки лет ученые исследуют возможности применения генного драйва для борьбы с болезнями и другими проблемами. Росту популярности этого направления способствовало появление технологии редактирования генов *CRISPR*, которая позволяет легко внедрять генетический материал в конкретный участок хромосомы. В 2015 г. в нескольких статьях сообщалось об успешном распространении генных драйвов у дрожжей, дрозофил и москитов с помощью системы *CRISPR*. В одном из исследований гены устойчивости к малярийному плазмодию внедрились в популяции москитов, что теоретически должно ограничить перенос паразита. В другом эксперименте вмешательство касалось регуляции плодовитости самок разных видов москитов.

В 2018 г. система генного драйва — *CRISPR* была протестирована на мышах: ученые пытались манипулировать окраской шерсти. Процедура сработала только на самках. Но даже в этом случае результаты свидетельствуют, что технология может помочь уничтожить или изменить популяции инвазивных мышей и других млекопитающих — переносчиков болезней или представляющих угрозу для культур зерновых или дикой природы.

Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (*DARPA*) входит в число инвесторов,

заинтересованных в развитии технологии. DARPA предоставило финансирование в размере \$100 млн на исследование применения генного драйва для борьбы с болезнями, переносчиками которых служат москиты, и инвазивными видами грызунов. Фонд Билла и Мелинды Гейтс инвестировал \$75 млн в исследовательский консорциум, работающий над созданием генного драйва для борьбы с малярией.

Несмотря на многообещающие перспективы, использование генных драйвов вызывает множество опасений. Могут ли генные драйвы случайно передаваться другим видам в дикой природе и отрицательно повлиять на них? Каковы риски для экосистемы в связи с уничтожением выбранного вида? Смогут ли кто-то злонамеренно использовать генные драйвы в качестве оружия, скажем, чтобы вредить сельскому хозяйству?

Пытаясь избежать подобного мрачного развития событий, одна команда исследователей изобрела «переключатель», который необходимо «включить» путем доставки определенного вещества, чтобы генный драйв стал работать. Параллельно множество групп ученых работают над протоколами, регулирующими проведение каждой стадии проверки генных драйвов. Например, в 2016 г. Национальная академия наук США и входящие в ее состав Национальная инженерная академия и Институт медицины провели изучение технологии и разработали

рекомендации по ответственному применению. В 2018 г. большая международная рабочая группа разработала дорожную карту для управления исследованиями от экспериментов в лаборатории до реализации в реальных условиях. Группа (некоторые из встреч посещали наблюдатели от DARPA, фонда Гейтсов и других агентств) создала модельные рекомендации по использованию генного драйва для контроля малярии в Африке, где, по их мнению, технология могла бы принести наибольшую пользу для здравоохранения.

Помимо ограничения рисков, связанных с самой технологией, многие исследователи хотят избежать неверных шагов и инцидентов, которые могли бы привести к негативной реакции общественности или политиков. В изданном в 2017 г. очерке о возможном использовании генного драйва для уничтожения млекопитающих-вредителей Кевин Эсвелт (Kevin Esvelt) из Массачусетского технологического института и Нил Геммелл (Neil Gemmell) из Отагского университета в Новой Зеландии высказали опасения, что из-за какого-нибудь международного инцидента исследование может быть отложено на десятилетие или более. «Только в том, что касается малярии, — предсказывают ученые, — цена такой отсрочки может измеряться миллионами смертей, которые можно было предотвратить».



ТЕХНИКА

ОБНАРУЖЕНИЕ ТОКСИНОВ С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМОНИКИ

АКТИВИРУЕМЫЕ СВЕТОМ НАНОМАТЕРИАЛЫ ВЫВОДЯТ ПРОИЗВОДСТВО СЕНСОРОВ НА НОВЫЙ УРОВЕНЬ

Хавьер Гарсиа Мартинес

В 2007 г. в статье в *Scientific American* Гарри Этвотер (Harry A. Atwater) из Калифорнийского технологического института предсказал, что технология, которую он назвал плазмоники, может найти широкое применение — от крайне чувствительных биодетекторов до плащей-невидимок. Десять лет спустя ряд идей плазмоники стали коммерческой реальностью, а другие находятся на стадии выхода из лаборатории на рынок.

Эти технологии основаны на управлении взаимодействием электромагнитного поля и свободных электронов металла (как правило, золота или серебра), отвечающих за оптические свойства металла и его проводимость. Попадание света возбуждает коллективные колебания свободных электронов

на поверхности металла — образуется поверхностный плазмон. Когда кусок металла большой, свободные электроны отражают падающий свет, поэтому материал блестит. Но если размеры частицы металла составляют всего несколько нанометров, его свободные электроны локализованы в очень маленьком пространстве, поэтому диапазон частот коллективных колебаний ограничен. Конкретная частота колебаний зависит от размера наночастицы металла. Явление, при котором плазмон поглощает только ту часть света, частота которого совпадает с собственной частотой плазмона, и отражает остальной свет, называется плазмонным резонансом. Поверхностный плазмонный резонанс можно использовать для создания наноантенн, эффективных солнечных батарей и других полезных устройств.

Одна из наиболее изученных областей применения плазмонных материалов — сенсоры для определения химических и биологических агентов. Один из подходов основан на том, что ученые наносят на плазмонный наноматериал вещество, которое связывается с интересующей молекулой, например бактериальным токсином. В отсутствие токсина свет, падающий на материал, переизлучается под определенным углом. Но в присутствии токсина частота поверхностного плазмона изменится, следовательно, изменится и угол отраженного света. Этот эффект можно измерить очень точно, что дает возможность даже отследить количества определяемого токсина. Несколько вновь созданных компаний разрабатывают продукты на основе этого и связанных с ним методов. К числу таких продуктов относятся внутренний датчик аккумуляторов, позволяющий отследить работу батарей и оказывающий помощь в повышении их удельной мощности и увеличении силы тока при зарядке, а также устройства, которые способны отличить вирусные инфекции от бактериальных. Плазмоника находит применение также в запоминающих устройствах на магнитных дисках. Например, магнитные записывающие устройства с нагревом увеличивают объем памяти за счет моментального прогревания крошечных участков диска во время записи.

В области медицины проводятся клинические испытания возможного применения активируемых светом наночастиц для лечения рака. Наночастицы вводятся в кровь, после чего они концентрируются внутри опухоли. Затем массу освещают светом той же частоты, что и у поверхностного плазмона, вызывая нагревание частиц в результате резонанса. Высокая температура приводит к гибели раковых клеток внутри опухоли без повреждения окружающей здоровой ткани.

Чтобы добиться успеха в области применения технологии плазмоники, вновь создаваемым компаниям необходимо убедиться, что их продукты недороги и надежны, что их просто

производить в больших объемах и можно интегрировать с другими компонентами. Несмотря на эти проблемы, перспективы благоприятны. Появление метаматериалов — синтетических наноматериалов, в которых плазмоны порождают необычные оптические эффекты, — позволило исследователям в области плазмоники использовать помимо золота и серебра иные материалы, такие как графен и полупроводниковые метаматериалы. *Future Market Insight* прогнозирует, что объем североамериканского рынка только в области применения плазмонных сенсоров вырастет с почти \$250 млн в 2017 г. до \$470 млн к 2027 г.



ИНФОРМАТИКА

АЛГОРИТМЫ ДЛЯ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ

РАЗРАБОТЧИКИ СОВЕРШЕНСТВУЮТ
ПРОГРАММЫ ДЛЯ КВАНТОВЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Алан Аспуру-Гузик

Квантовые компьютеры за несколько лет могут догнать или даже превзойти классические компьютеры, так как ведется интенсивная работа над аппаратным обеспечением и алгоритмами.

Для выполнения вычислений квантовые компьютеры используют принципы квантовой механики. Базовая единица информации, кубит, аналогична стандартному биту (0 или 1), но представляет собой квантовую суперпозицию между двумя квантовыми состояниями: кубит может быть и нулем, и единицей одновременно. Это свойство наряду с другой уникальной характеристикой — квантовой перепутанностью — позволяет квантовым компьютерам решать определенные группы задач более эффективно, чем любой обычный компьютер.

Тем не менее эта интересная технология очень сложна. Так, например, функционирование квантового компьютера нарушает процесс, называемый декогеренцией. Исследователи определили, что можно создать строго управляемые квантовые компьютеры с несколькими тысячами кубитов, если задействовать способы коррекции квантовых ошибок для противодействия декогеренции. Но самые большие квантовые компьютеры, которые пока продемонстрировали лаборатории (наиболее известные примеры — компьютеры от IBM, Google, Rigetti Computing и IonQ), содержат всего десятки кубитов. Эти версии, которые Джон Прескилл (John Preskill) из Калифорнийского технологического института назвал квантовыми компьютерами среднего размера с шумами (NISQ), пока не могут осуществлять коррекцию ошибок. Однако множество исследователей занимаются разработкой алгоритмов специально для NISQ, и это, возможно, позволит таким устройствам выполнять определенные вычисления более эффективно, чем классические компьютеры.

Увеличение доступа пользователей по всему миру к машинам NISQ вносит значительный вклад в развитие этого направления, поскольку все больше ученых в университетах получают

возможность разрабатывать и тестировать небольшие программы для таких машин. Развивается комплекс вновь созданных компаний, сосредоточенных на разных аспектах программного обеспечения для квантовых компьютеров.

Исследователи считают наиболее перспективными два вида алгоритмов для NISQ: для моделирования и для машинного обучения. В 1982 г. легендарный физик-теоретик Ричард Фейнман предположил, что одной из самых важных областей применения квантовых компьютеров будет моделирование самой природы: атомов, молекул и материалов. Многие исследователи, включая меня, разрабатывают алгоритмы для моделирования молекул и материалов на устройствах NISQ (а также на будущих квантовых компьютерах с полной коррекцией ошибок). Такие алгоритмы могли бы ускорить разработку новых материалов для разных областей — от энергетики до медицины.

Разработчики также оценивают возможности квантовых компьютеров для решения задач машинного обучения, в которых компьютеры учатся на основе больших массивов данных или опыта. Тестирование растущего числа алгоритмов для NISQ-устройств показало, что квантовые компьютеры действительно могут выполнять такие задачи машинного обучения, как классификация информации по категориям, группировка похожих терминов или признаков и составление новых статистических выборок из существующих: например, предсказывать молекулярное строение вещества, при котором наиболее вероятно будет проявляться нужное сочетание свойств. По меньшей мере три независимые исследовательские группы сообщили о прогрессе в разработке квантовой версии метода машинного обучения, известного под названием «генеративно-сопоставительные сети» (GAN), который произвел фурор в области машинного обучения в последние несколько лет.

Несмотря на то что ряд алгоритмов, похоже, хорошо работают на существующих машинах NISQ, пока никто не представил формальных доказательств того, что такие алгоритмы мощнее по сравнению с теми, что могут выполняться на обычных компьютерах. Собрать такие доказательства сложно, и, возможно, на это уйдут годы.

Развивается комплекс вновь созданных компаний, сосредоточенных на разных аспектах программного обеспечения для квантовых компьютеров

В ближайшие несколько лет исследователи, скорее всего, разработают более крупные и управляемые устройства NISQ, а потом появятся машины с полной коррекцией ошибок, оперирующие тысячами кубитов. Те из нас, кто работает над алгоритмами, надеются, что алгоритмы для NISQ будут достаточно эффективны, чтобы превзойти обычные современные компьютеры, хотя, возможно, нам придется подождать, пока появятся квантовые машины с полной коррекцией ошибок. ■

Перевод: С.М. Левензон

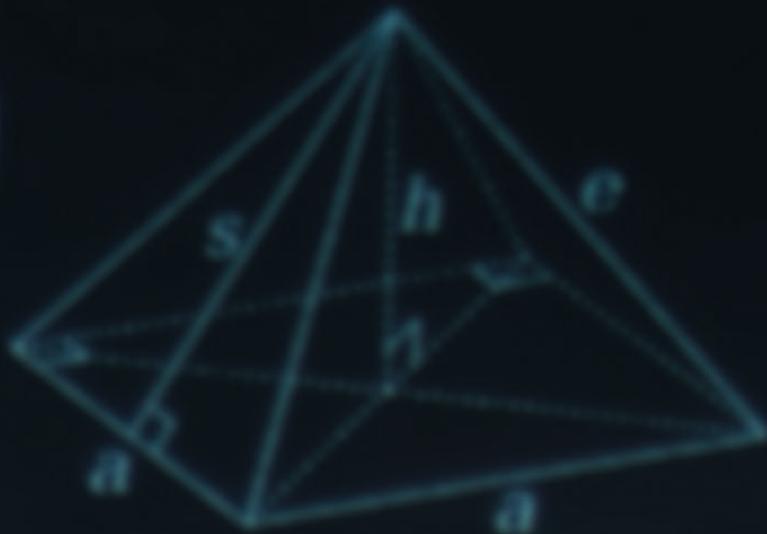
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Этуотер Г. Плазмоника // ВМН, № 8, 2007.
- Трэси К. Лечение током // ВМН, № 5–6, 2015.
- Лукин М., Монро К., Шелькопф Р. Квантовые связи // ВМН, № 7, 2016.
- Домингос П. Наши цифровые двойники // ВМН, № 11, 2018.
- The Top 10 Emerging Technologies of 2017. Scientific American and World Economic Forum, June 26, 2017.

λομένην, ἢ μυρί' Ἀχαιοῖς
ἄλλας δ' ἰφθίμους ψυχὰς Ἄλκιυ

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Comment allez-vous?



ἀλγέ' ἔθηκε,
Αἶδι προΐαψεν

T

НЕЙРОБИОЛОГИЯ

ОБУЧЕНИЕ ВО СНЕ — РЕАЛЬНОСТЬ?

С помощью экспериментов ученые
выяснили, как можно укрепить
память, пока мозг спит

Кен Паллер и Дельфина Удиетт



ОБ АВТОРАХ

Кен Паллер (Ken A. Paller) — профессор психологии и руководитель программы по когнитивной нейробиологии в Северо-Западном университете. Проведенное им недавно исследование направленной реактивации памяти финансировалось Национальным научным фондом США.



Дельфина Удиетт (Delphine Oudiette) — научный сотрудник Национального института здравоохранения и медицинских исследований Франции в Институте головного и спинного мозга и в отделении расстройств сна Больницы Сальпетриер в Париже.



В

романе Олдоса Хаксли «О дивный новый мир» мальчик запоминает каждое слово лекции на английском, хотя не владеет языком. Обучение происходит, когда ребенок спит там, где слышна радиопередача с лекцией. Проснувшись, он может повторить весь материал. Используя это открытие, тоталитарные власти созданного Хаксли антиутопического мира приспособили методику, чтобы влиять на подсознание своих граждан.

Обучение во сне неоднократно встречается в древней истории, в литературе и в поп-культуре. Возьмите, например, Декстера, главного героя мультсериала «Лаборатория Декстера». В одном из эпизодов он не выполнил вовремя домашнее задание, поэтому изобрел приспособление, позволяющее за ночь научиться говорить по-французски. Проснувшись на следующий день, Декстер понимает, что не может говорить на каком-либо другом языке, кроме французского. Идея обучения во сне — не современная выдумка. Она присутствует в многовековой практике тибетских монахов: сообщения, нашептанные во время сна, должны были помочь монаху понять, что происходящее в его снах — иллюзия.

Всем известно, что мы лучше учимся, если хорошо отдохнули. При этом большинство людей категорически отвергают идею обучения во сне. Однако некоторые новые нейробиологические открытия показывают, что картина на самом деле сложнее и важнейшая часть обучения происходит во время сна: недавно сформированные воспоминания всплывают ночью, и такое воспроизведение способствует их укреплению, чтобы как минимум некоторые из них запомнились на всю жизнь.

В нескольких исследованиях проверяли, можно ли повлиять на сон так, чтобы улучшить обучение. Оказалось, что закрепление воспоминаний о дневных событиях можно усилить с помощью

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Сон долгое время оставался таинственным явлением, и люди недооценивали возможность использовать его для обучения. Считали, что поскольку спящий мозг не активен, он не может учиться.
- Оказалось, однако, что наш мозг во время сна поддерживает высокую активность, которая помогает сохранять воспоминания. Недавно выяснилось, что во время сна активируются определенные воспоминания.
- С помощью экспериментов с управляемой реактивацией памяти можно изучать, как улучшается обучение благодаря сну ночью.
- В дальнейшем можно расширить эти исследования, чтобы решить проблемы, связанные со сном, избавиться от кошмаров и, быть может, когда-нибудь научиться контролировать наши сновидения.

звуков или запахов. На грызунах была показана даже примитивная форма имплантации воспоминаний: с помощью электрической стимуляции во время сна исследователи учили животных, в какую часть клетки им надо отправиться после пробуждения. Такое обучение, которое представлял себе Хаксли, когда в течение ночи дословно запоминаются целые тексты, по-прежнему остается только на страницах его знаменитой книги, написанной в 1932 г. Однако сейчас показано, что пока человек погружен в сон, можно влиять на его воспоминания, и эти исследования закладывают основу для новой науки обучения во сне.

Психофон

Для того чтобы эти приемы работали, ученым надо выяснить, как может поглощаться информация, когда сознание вроде бы находится на заслуженном отдыхе. Примерно в то время, когда Хаксли писал свою книгу, начались серьезные исследования возможности вмешиваться в сон. В 1927 г. Алоиз Сэлиджер (Alois Saliger) из Нью-Йорка изобрел «автоматическую машину для внушения с управлением по таймеру», на которую можно было записывать сообщения, чтобы воспроизводить их в течение ночи. Он продавал ее под названием «психофон». Этот прибор, казалось, использовал технологию, придуманную Хаксли, с той разницей, что проигрываемое сообщение выбирал пользователь, а не власти.

Изобретение Сэлиджера получило продолжение в 1930-х и 1940-х гг., когда были проведены эксперименты, якобы подтвердившие обучение во сне. В 1942 г. в статье Лоуренса Лешана (Lawrence LeShan), работавшего тогда в Колледже Вильгельма и Марии, подробно описан эксперимент в летнем лагере, где многие дети имели привычку грызть ногти. В комнате, где спали 20 мальчиков, Лешан с помощью портативного фонографа воспроизводил голос, говоривший: «У моих ногтей ужасно горький вкус». Эта фраза повторялась по 300 раз каждую ночь, начиная со 150 минут после отбоя. Эксперимент продолжался 54 ночи подряд. В последние две недели в лагере сломался фонограф, и героический Лешан сам повторял слова. Восемь из 20 этих мальчиков перестали грызть ногти, в то время как среди тех 20, которым запись не проигрывалась, не перестал никто. Но в этих ранних работах не использовался физиологический контроль, чтобы подтвердить, что дети действительно спали, поэтому результаты остаются сомнительными.

Это направление исследований получило серьезный удар в 1956 г., когда два ученых из корпорации RAND использовали электроэнцефалографию (ЭЭГ), чтобы записать активность мозга в то время, как спящим участникам зачитывали 96 вопросов и ответов. (Например: «В каком

магазине работал Улисс Грант до войны?») Ответ: «В хозяйственном»). На следующий день правильно была воспроизведена только та информация, которая звучала, когда у спящих отмечались признаки пробуждения. Из-за таких результатов исследования приостановились на 50 лет, поскольку ученые сомневались в том, что обучение во сне действительно существует: участники экспериментов, казалось, учились, только если не спали по-настоящему, когда им сообщали информацию.

В этот период большинство ученых старались избегать исследования обучения во сне, хотя некоторые из них тесно занялись похожей проблемой, выясняя, помогает ли сон запоминать новую информацию. Типичное исследование такого рода состояло в том, чтобы проверить, повлияет ли ночь, проведенная без сна, на воспроизведение данных, выученных накануне. В других работах выясняли, в каком случае запоминание будет лучше — после короткого сна или после такого же периода бодрствования.

Результаты подобных исследований могут искажаться различными факторами. Например, стресс от недостатка сна может нарушать когнитивные функции, что ухудшит воспроизведение воспоминаний. Но в конце концов специалисты по когнитивной нейробиологии справились с этими трудностями, обобщив данные, полученные с помощью разных методов. Постепенно накопились веские доказательства, что во время сна происходит повторная активация воспоминаний, полученных в течение дня, и взаимосвязь между сном и памятью вновь стала полноценной темой научных исследований.

Многие ученые, работающие в данной области, сосредоточились на изучении фазы быстрого сна (она же фаза быстрых движений глаз — БДГ), когда сновидения наиболее частые и яркие. Предполагалось, что ночная обработка воспоминаний связана со сновидениями, но однозначных подтверждений этому не было. В 1983 г. Грэм Митчисон (Graeme Mitchison) и Фрэнсис Крик (Francis Crick) — два известных ученых, ни один из которых не был психологом, — зашли довольно далеко, предположив, что БДГ-сон нужен для забывания. Аналогично Джулио Тонони (Giulio Tononi) и Кьяра Чирелли (Chiara Cirelli), работавшие в Висконсинском университете в Мадисоне, предположили, что сон может быть тем периодом времени, когда ослабляются связи между клетками мозга, чтобы на следующий день лучше запоминалась новая информация.

Некоторые исследователи вместо БДГ-сна сосредоточили свое внимание на медленном сне, периоде глубокого сна без быстрых движений глаз. В 2007 г. Бьорн Раш (Bjorn Rasch), работавший тогда в Любекском университете в Германии, вместе

Сон как дирижер

Память и сон связаны сложной симфонией нейронной активности

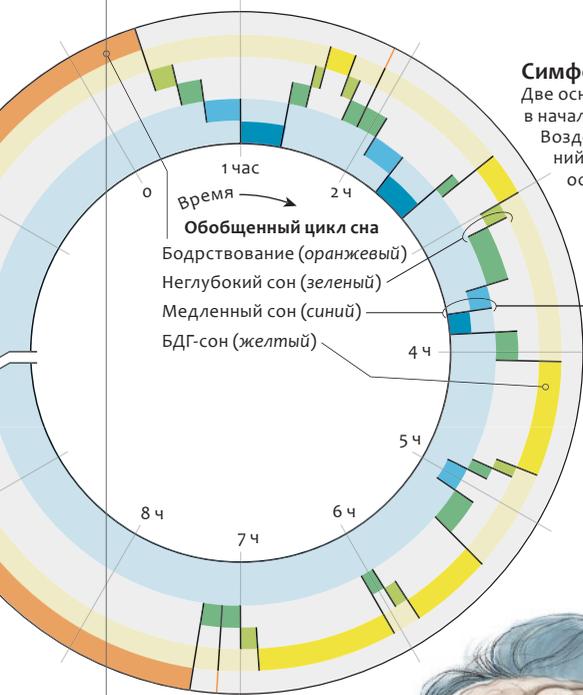
Исследование ритмов головного мозга помогает понять, как сон участвует в закреплении воспоминаний для последующего извлечения. Так, медленноволновые колебания, происходящие с частотой 0,5–4 раза в секунду, отражают активность нейронов в коре. Каждое такое колебание состоит из спада, когда нейроны замолкают, и подъема, когда они возобновляют активность. Эта синхронность помогает закрепить недавно сформированные воспоминания, обеспечивая одновременную активность многих областей коры.

На фазе подъема могут появляться сонные веретена — быстрое учащение ритма до 12–15 колебаний в секунду. Сонные веретена возникают в таламусе, через который проходит информация, передающаяся практически в любую часть коры. Веретена имеют свой собственный ритм, повторяясь примерно с пятисекундным интервалом. Они координируют остроконечные волны в гиппокампе. Остроконечные волны, в свою очередь, возникают одновременно с проигрыванием воспоминаний. Медленные волны тем временем выполняют роль дирижера в этом оркестре: их неторопливые колебания в коре задают темп сонным веретенам и остроконечным волнам. Сложная взаимосвязь таких колебаний обеспечивает реактивацию памяти и изменения связи между нейронами для закрепления воспоминаний.

Диалог между гиппокампом и корой, в котором участвуют все эти ритмы, запускает сложный комплекс взаимодействий в нервной сети. Благодаря этому процессу, называемому консолидацией, новая информация может встраиваться в уже существующую систему воспоминаний. Такое переплетение воспоминаний позволяет понять суть недавно приобретенного опыта и его смысл в нашем запутанном мире.

Если этот нейронный диалог нарушен, могут возникнуть проблемы с памятью. У людей с серьезным повреждением гиппокампа или участков таламуса может развиваться глубокая амнезия. Без взаимодействия с этими областями мозга во время сна и бодрствования кора не может сохранять воспоминания о фактах и событиях, то есть так называемую декларативную память. Кроме того, более легкое нарушение памяти может возникать, если сильно повреждена обработка воспоминаний во время сна.

По мере того как мы все лучше понимаем физиологическое устройство оркестра, звучащего в спящем мозге, могут появляться новые стратегии для улучшения естественных ритмов мозга с помощью различных форм электрической или сенсорной стимуляции. Люди всегда пытались делать что-то подобное, используя колыбельную песню или укачивая младенца, чтобы он уснул.



Симфония в двух частях

Две основные фазы сна принципиально различаются. Медленный, или глубокий, сон преобладает в начале ночи. Во время медленного сна спонтанно реактивируются некоторые воспоминания. Воздействия, способствующие этому процессу, помогают обеспечить сохранение воспоминаний. Быстрый сон (БДГ) преобладает в последней части ночного сна, но его влияние на память остается спорным.

Гармонизация мозговых волн

Колебания в мозге во время сна, по-видимому, играют важную роль в закреплении новых воспоминаний. Ключевой момент — восходящая фаза медленного колебания, которая координирует остальные ритмы мозга. Восходящая часть медленного колебания в коре синхронизирована с сонными веретенами в таламусе. Остроконечные волны в гиппокампе координируются веретенами. Остроконечные волны, как правило, совпадают с окончанием сонного веретена.

Электрическая активность мозга

Медленные волны

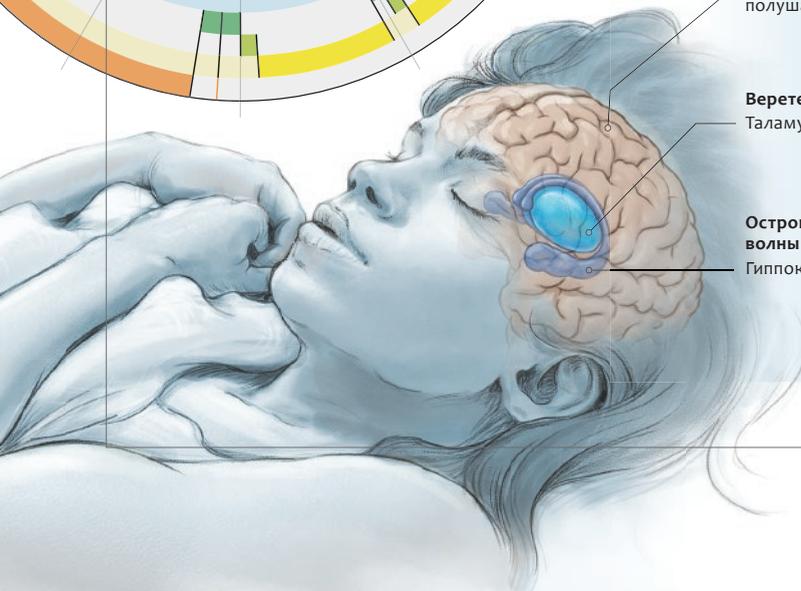
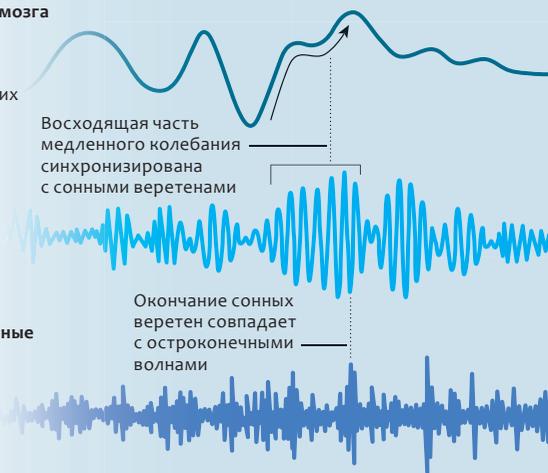
Кора больших полушарий

Веретена

Таламус

Остроконечные волны

Гиппокамп



с коллегами перед началом эксперимента просил людей запомнить расположение нескольких объектов и одновременно давал им нюхать розу. Позже, когда люди спали в своих кроватях в лаборатории, они снова сталкивались с тем же запахом в разные фазы сна, которые определялись с помощью ЭЭГ. Запах вызывал активацию гиппокампа — структуры мозга, необходимой для обучения ориентации в пространстве и закрепления новых знаний. При пробуждении участники точнее вспоминали расположение предметов, если запахи предъявлялись им во время медленного, а не быстрого сна.

Направленная реактивация памяти

В 2009 г. наша лаборатория применила расширенный вариант этой методики, используя звуки вместо запахов. Мы обнаружили, что звуки, проигрывавшиеся во время медленного сна, могут улучшать воспоминание об определенных объектах по нашему выбору (а не обо всем наборе предметов, как это было в исследовании с использованием запахов). В соответствии с нашей методикой, которую мы назвали направленной реактивацией памяти, вначале люди запоминали расположение 50 объектов. Например, они учились размещать кошку в одном месте компьютерного экрана, а чайник в другом. При этом они слышали соответствующий звук (мяуканье для кошки, свист для чайника и т.д.).

После периода обучения участникам давали возможность поспать в комфортных условиях у нас в лаборатории. Разместив электроды на голове человека, мы регистрировали ЭЭГ, чтобы убедиться, что он крепко спит. Благодаря этой регистрации мы получили интересные данные о синхронизированной активности нервных сетей в наружном слое мозга — коре, задействованной в реактивации памяти. Когда мы регистрировали медленный сон, мы включали мяуканье, свист и другие звуки, связанные с объектами, использовавшимися на стадии обучения. Звуки были тихими, ненамного громче фонового шума, поэтому спящий не просыпался.

После пробуждения люди лучше вспоминали расположение тех объектов, о которых им напоминали во время сна, чем тех, о которых не напоминали. Запаховые и звуковые напоминания в этих экспериментах, по-видимому, вызывали реактивацию пространственных воспоминаний и таким образом снижали забывание.

Сначала использование нами звуковых сигналов вызвало большие споры. У исследователей сна принято считать, что во время сна все сенсорные пути в коре кроме обоняния в значительной степени находятся в выключенном состоянии. Нам не смутило это общепринятое мнение. Мы подтвердили наше предположение, что повторяющееся проигрывание тихих звуков может повлиять на спящий мозг и вызвать изменения в недавно сохраненных воспоминаниях.

Более того, похожие улучшения памяти были обнаружены во многих последующих исследованиях. С помощью магнитно-резонансной томографии показано, какие области мозга задействованы при направленной реактивации памяти, а ЭЭГ-данные выявили важность определенной волновой активности мозга.

Помимо усиления пространственной памяти, эти методики помогли улучшить воспроизведение воспоминаний и в других условиях. Направленная реактивация памяти может быть полезна при обучении наигрывания мелодий на клавиатуре, освоении новой лексики или грамматических правил.

Метод помогает и при более простых формах обучения, в частности при коррекции образа тела. В экспериментах по выработке условных рефлексов направленная реактивация памяти помогает изменить предвзвешенную реакцию на стимул, когда он сочетался с ударом током. Проводятся работы, в которых исследуют другие разновидности воспоминаний, например связь имени с лицом при первой встрече с новым человеком.

По мере развития технологии надо будет проверить, может ли направленная реактивация памяти помочь при

лечении различных заболеваний, снижении зависимости и восстановлении после болезни. Наша лаборатория вместе с неврологом из Северо-Западного университета Марком Слутцки (Marc Slutzky) сейчас тестирует новый метод реабилитации для восстановления способности двигать руками после инсульта. Напоминающие звуки используются как часть лечения и воспроизводятся во время сна, чтобы попытаться ускорить повторное обучение утраченным движениям. Подход кажется многообещающим, поскольку показано, что направленная реактивация памяти может влиять на похожие формы двигательного обучения у здоровых людей.

В будущем программы обучения во сне помогут сохранить воспоминания, ускорить усвоение новых знаний или даже избавиться от вредных привычек, таких как курение

А как насчет обучения французскому языку?

Поскольку показана возможность усиливать память, возникает вопрос, можно ли загружать новую информацию в мозг человека во время сна? Снова на горизонте начинает маячить призрак контроля над разумом из «Дивного нового мира». Не слишком ли далеко мы зайдем, если представим, что таким скрытым образом можно создавать воспоминания?

Несмотря на то что долгие годы такие предположения категорически отвергались, Анат Арзи (Anat Arzi) из Кембриджского университета вместе с коллегами продемонстрировала создание относительно простых воспоминаний с помощью запахов. В одном эксперименте исследователям удалось снизить влечение к табаку у курильщиков. Во время сна участники исследования подвергались воздействию двух запахов: сигаретного дыма и тухлой рыбы. В течение следующей недели те, кто вдыхал эту смесь из обоих запахов, закуривали на 30% реже, поскольку, видимо, связали курение с отталкивающим рыбным запахом.

Создание более сложных воспоминаний не так просто, но и это когда-нибудь может стать реальностью. Карим Беншенан (Karim Benchenane) из Национального центра научных исследований Франции с коллегами показали, как можно изменить содержание воспоминаний — правда, только у мышей. Когда они начинали эту работу, Беншенан и его команда знали, что при исследовании мышами новой среды нейроны, называемые клетками места, разряжаются в момент попадания животного в определенную часть пространства. Те же нейроны разряжаются вновь во время сна, когда предположительно происходит проигрывание воспоминаний.

Исследователи стимулировали систему подкрепления в мозге мыши (медиальный пучок переднего мозга) именно тогда, когда клетки места спонтанно активировались у спящего животного. Поразительно, что грызуны потом проводили больше времени в тех местах, которые соответствовали клеткам места, связанным со стимуляцией, и направлялись туда сразу, как только просыпались. Требуются дополнительные эксперименты, чтобы понять, были ли мышам созданы полноценные ложные воспоминания или животные автоматически отреагировали в эти места из-за выработанного рефлекса, не имея никакого представления о том, почему их туда влечет.

Еще предстоит выяснить, каковы пределы возможностей такого обучения, но это исследование уже продемонстрировало, что обучение может продолжаться и во время ночного выключения сознания. Сон необходим не только для того, чтобы восстановить силы, но и для закрепления воспоминаний, приобретенных во время бодрствования. Нам нужно еще многое узнать об обработке

воспоминаний во время сна. Дальнейшие исследования позволят выяснить, как сон помогает обучению и какие механизмы в мозге обеспечивают сохранение наиболее ценных воспоминаний. Необходимо также больше узнать об опасностях недостаточного или неполноценного сна, который может быть следствием различных жизненных стрессов, некоторых заболеваний или старения.

Исследование, проведенное под руководством Кармен Вестенберг (Carmen Westerberg), работавшей тогда в Северо-Западном университете, указывает нужное направление. Вестенберг тестировала пациентов с легким нарушением памяти, которое часто предшествует болезни Альцгеймера. В результате выяснилась связь между недостаточным сном и снижением способности вспомнить информацию после перерыва на ночной сон.

Все эти сведения могут быть полезны при создании программ обучения во сне с целью сохранить воспоминания, ускорить усвоение новых знаний или даже избавиться от вредных привычек, таких как курение. В перспективе исследователи могли бы заняться поиском способа контролировать сновидения, чтобы избавляться от кошмаров, решать сложные задачи во сне и, может быть, даже смотреть развлекательные сны. В культуре, где уже есть браслеты, отслеживающие сон, и возможность отправить пробы на генетический анализ по почте, мы можем начать задумываться о том, чтобы использовать ежесуточное время сна для продуктивной деятельности. Кого-то такая перспектива пугает, но для других это еще одна долгожданная возможность преодолеть существующие ограничения. ■

Перевод: М.С. Багоцкая

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Стикголд Р. Утро вечера мудренее // ВМН, № 12, 2015.
- Уолкер М. Зачем мы спим. Новая наука о сне и сновидениях. М.: КоЛибри, 2018.
- The Secret World of Sleep: The Surprising Science of the Mind at Rest. Penelope A. Lewis. Palgrave Macmillan, 2013.
- Upgrading the Sleeping Brain with Targeted Memory Reactivation. Delphine Oudiette and Ken A. Paller in Trends in Cognitive Sciences, Vol. 13, No. 3, pages 142–149; March 2013.
- Sleeping in a Brave New World: Opportunities for Improving Learning and Clinical Outcomes through Targeted Memory Reactivation. Ken A. Paller in Current Directions in Psychological Science, Vol. 26, No. 6, pages 532–537; December 2017.

12+

Фото вислоного рачка (*Eipsichura balcaensis*),
полученное при помощи сканирующего электронного
микроскопа FE Quanta 200. Автор: Игорь Зайдаков



НАУКА
ТЕЛЕКАНАЛ

Реклама

ПРОСТО О СЛОЖНОМ

naukatv.ru



ПОЗНАНИЕ



МОЯ ПЛАНЕТА
Телеканал



НАУКА
Телеканал



ЖИВАЯ ПЛАНЕТА
Телеканал



ПЛАНЕТА HD
Телеканал



ИСТОРИЯ
Телеканал



ДОКТОР
Телеканал



ТЕЛЕКАНАЛ



ДЕТИ СОЛНЦА

Среди заснеженных подмосковных просторов, вдали от столичной суеты находится Долгопрудненская научная станция ФИАН, носящая поэтическое название «Лаборатория физики Солнца и космических лучей». Путь сюда непрост: «Езжайте мимо новых корпусов МФТИ, потом по дорожке до зеленого забора, — предупреждает заведующий станцией доктор физико-математических наук **Владимир Салимгереевич Махмутов**. — Дальше ехать не надо, дорога занесена снегом». Мы нашли нужный забор, постучали... Трудно предположить, что в этих маленьких уютных домиках, где с крыш свисают огромные сосульки, проводятся уникальные научные эксперименты и рождаются важные открытия, имеющие планетарное значение. Но это правда.

— Владимир Салимгереевич, давайте вспомним, как все начиналось.

— Наша лаборатория носит имя академика С.Н. Вернова. Именно по его инициативе в 1946 г. была создана Долгопрудненская научная станция (ДНС) Физического института Академии наук СССР. Он стал ее первым директором.

История возникновения станции крайне интересна: как раз в эти годы в Советском Союзе были начаты работы по атомному проекту. Атомное оружие — это ядерные реакции, и нужно было получить определенные физические константы, характеристики взаимодействия. В этих целях 4 марта 1946 г. И.В. Сталин подписал решение Совета народного хозяйства о создании в городе Долгопрудном научной станции Физического института АН СССР для изучения космических лучей в атмосфере Земли. С этого момента станция начала свою жизнь. Несмотря на то что прошло уже много лет, наш коллектив успешно работает, и это здание у нас до сих пор «живое».

— Умели строить!

— Кроме главного корпуса у нас есть несколько небольших лабораторных и производственных построек, которые мы стараемся сохранить в рабочем состоянии. Здесь, на Долгопрудненской научной станции, более 70 лет назад начались экспериментальные работы по изучению физики ядерных взаимодействий. Были разработаны и созданы соответствующие экспериментальные установки, которые строились на счетчиках заряженных частиц. Основная задача включала в себя изучение состава и спектров космических лучей и характеристик их ядерных взаимодействий с ядрами воздуха в широком интервале энергий. Эксперименты проводились на шарах-зондах, а позднее — на высотных самолетах. Ученые поднимали свою аппаратуру вплоть до высот 25–30 км и получали необходимые экспериментальные данные о физических взаимодействиях заряженных частиц высоких энергий. Таким образом, во второй половине 1940-х гг. прошлого столетия были начаты

атмосферные исследования в области ядерной физики и физики космических лучей, которыми мы занимаемся и по сей день.

— Как связаны ядерные взаимодействия и космические лучи?

— Космические лучи, которые поставляет наша Галактика, состоят из заряженных частиц. В результате взаимодействия этих частиц высоких энергий с ядрами воздуха происходят ядерные реакции в атмосфере. Продукты таких реакций мы с вами видим начиная с поверхности Земли до высот 30–35 км, куда поднимаются наши приборы. Кроме запусков радиозондов мы проводим эксперименты с помощью наземных установок, которые регистрируют потоки заряженных и нейтральных частиц. Это установки типа «Ковер» — по-английски *CARPET*.

— Почему «Ковер»?

— Расположение счетчиков ковровое: сверху одна плоскость счетчика, внизу — другая. Две плоскости счетчиков разделены поглотителем. Он используется для того, чтобы разделить потоки заряженных частиц по энергии. Такая методика позволяет отделить частицы космических лучей от радиоактивности.

Другой тип детекторов регистрирует нейтронный компонент космических лучей. Но эти установки — лишь дополнение к нашему основному эксперименту.

— А что представляет собой основной эксперимент?

— Наша лаборатория была создана для исследования космических лучей и процессов их ядерных взаимодействий в атмосфере Земли. Поэтому с момента ее создания по настоящее время мы проводим запуски научной аппаратуры в атмосферу. До 1957 г. такие измерения были нечастыми (один-два раза в месяц), а начиная с середины 1957 г. стали проводиться чаще. Три раза в неделю осуществляются одновременные запуски шаровзондов в Антарктиде, в обсерватории «Мирный», в Мурманской области, совместно с сотрудниками Полярного геофизического института РАН, и здесь, на Долгопрудненской научной станции ФИАН. Прямо с этой площадки перед нашим зданием и происходит запуск научной аппаратуры — радиозондов космических лучей. Если завтра придете, станете свидетелями такого события.

— Как выглядит радиозонд космических лучей?

— Стандартный радиозонд космических лучей включает в себя детекторы заряженных частиц — газоразрядные счетчики, электронную схему с радиопередатчиком, датчик атмосферного давления и батареи питания. Все эти составные части помещены в пенопластовый корпус, чтобы обеспечить нормальный температурный режим для их работы. На высотах более 10 км температура

понижается до -60 – -80°C . После сборки и настройки радиозонд запускается в атмосферу на метеорологической оболочке. Вес современного радиозонда не превышает 600 г. Эта аппаратура должна быть достаточно легкой, чтобы подняться до высот 30–35 км. По радиоканалу мы ежеминутно получаем сигнал с нашего датчика.

— Где производят эту научную аппаратуру?

— С самого начала эксперимента ее собирают в этих стенах — ежегодно по 500 радиозондов. У нас сохранились старые образцы первых приборов, которые работали на ламповых элементах и весили 3 кг. Сейчас аппаратура стала значительно легче и одновременно усложнилась. Только детекторы заряженных частиц, которые покупаем на Саранском заводе, остались практически прежними. Электронные платы, позволяющие зарегистрировать и сформировать сигналы со счетчиков, мы собираем в нашей лаборатории. Своими силами изготавливаем датчики атмосферного давления и градуируем их на специальном стенде. Передатчик с разных высот атмосферы передает данные о потоках заряженных частиц. Очень важно, что эта информация идет сразу из трех пунктов наблюдений, так как потоки заряженных частиц в атмосфере зависят от геомагнитной широты.

— Что дают эти исследования?

— В первую очередь, они имеют фундаментальный характер. Главная задача заключается в том, чтобы исследовать потоки космических лучей в земной атмосфере и ответить на вопрос, насколько они стабильны, как они меняются со временем, каковы причины, вызывающие их модуляцию. Мы как земные наблюдатели видим потоки вторичных заряженных частиц в атмосфере, но породившие их первичные частицы приходят к нам издалека. Можно сказать, это отголоски галактических процессов — вспышек сверхновых звезд в нашей Галактике, которые поставляют космические заряженные частицы. Потом эти частицы приходят в Солнечную систему, где на них действует солнечный ветер, вызывающий модуляцию или временные изменения потоков частиц. Потоки заряженных частиц поставляет и Солнце, когда на нем происходят мощные вспышки. Во время таких процессов ускоряются протоны, ядра (вплоть до ядер железа) и электроны. Кроме того, нередко в земную атмосферу в полярных районах высыпаются из магнитосферы Земли потоки электронов. Нам необходимо дифференцировать все эти потоки, разобраться с их происхождением, различиями, влиянием на земную жизнь. Например, потоки космических лучей, которые модулируются Солнцем, поступают в нашу атмосферу и активно участвуют в образовании облачности. А от площади, покрытой облаками, зависят глобальная температура нижней атмосферы и климат на Земле.



Доктор физико-математических наук В.С. Махмутов

— Таким образом, фундаментальная наука оказывается близкой каждому из нас.

— Безусловно. Поток космических лучей служит главным источником ионизации в атмосфере. А ионизация играет огромную роль в атмосферных и электрических процессах, происходящих в земной атмосфере. Как вы знаете, Земля обладает электрическим полем. Его напряженность в приземном слое — порядка 120 В/м. Чем оно обусловлено? Именно ионизацией, которую создают космические лучи в атмосфере. Поэтому, исследуя вариации космических лучей, атмосферное электричество, магнитные возмущения, мы можем получить новую информацию о глобальном электрическом поле, об атмосферных процессах, таких как, например, нуклеация в земной атмосфере. Этот термин необходим для описания процессов создания кластеров молекул, которые в дальнейшем перерастают в зародыши облаков. Наши наблюдения потоков заряженных частиц в атмосфере позволяют также осуществлять оперативный контроль уровня ее радиоактивности. Радиоактивные облака в атмосфере появляются после испытаний ядерного оружия или аварий на предприятиях, использующих радиоактивные материалы.

— Удалось ли вам выявить закономерности в свойствах космических лучей?

— Да, детально исследованы 11-летний и 22-летний циклы в космических лучах, вызываемые соответствующими циклами на Солнце. Получены новые данные о связи потоков космических лучей

с электрическими явлениями в атмосфере. Например, молниевые разряды, которые видит каждый житель Земли, возникают благодаря космическим лучам, попадающим в нашу атмосферу. Изучены характеристики солнечных космических лучей, которые представляют серьезную опасность для космонавтов. В 2009 г. и в настоящее время потоки галактических космических лучей выросли более чем на 10%. Причина этого роста связана с уменьшением модуляции галактических потоков частиц, на которые очень сильно влияет солнечная активность.

— То есть солнечная активность тоже растет?

— Здесь как раз наоборот. Чем Солнце активнее, чем больше на нем пятен, или так называемых активных областей, тем больше возмущений выбрасывается в межпланетную среду. И, соответственно, эти межпланетные возмущения «выметают», как метлой, часть галактических космических лучей. И тогда потоки, которые приходят в межпланетное пространство и на Землю, уменьшаются.

— Получается, что активность Солнца в последние 60 лет уменьшается? А мы все время слышим, что увеличивается, что там происходят аномальные вспышки...

— Это не так. На основании экспериментальных данных, полученных в России и за рубежом, можно констатировать, что на протяжении последних 10–15 лет уровень солнечной активности уменьшается. Если говорить о временном ряде солнечных пятен, то он показывает все меньшие значения в максимуме солнечной активности. Сейчас мы переживаем эпоху глобального уменьшения солнечной активности.

— Но ведь это не означает, что Солнце затухает?

— Нет, речь идет лишь о продолжительном минимуме солнечной активности. Такие минимумы наблюдались на Солнце и в прошлом. Они происходят примерно раз в 150–200 лет. И мы видим этот процесс в нашем стратосферном эксперименте. Хотя и в этот период спада солнечной активности светило преподнесло нам сюрприз: 6–10 сентября 2017 г., на фазе спада активности, вблизи ее минимума вдруг появилась активная область, которая произвела серию солнечных вспышек высокого класса и огромный выброс коронального вещества. Ускоренные заряженные частицы вторглись в атмосферу Земли и достигли ее поверхности. Мы зарегистрировали эти потоки частиц в Антарктиде, а также измерили их на севере.

— Наверняка все это влияет на работу космических станций, спутников?

— Конечно, влияет, поскольку эти потоки увеличивают радиационную нагрузку на космонавтов, на все объекты, которые находятся либо в космическом пространстве, либо даже в атмосфере Земли.

— Как это отражается на земной жизни?

— Увеличивается ионизация в земной атмосфере, а это влияет на процессы, происходящие в ней, в том числе и на образование облачности. Люди, находящиеся на Земле, тоже могут почувствовать этот эффект, но благодаря тому, что существует атмосфера, эти потоки сильно уменьшаются.

— Это с точки зрения биологии. А с точки зрения техники проблемы могут быть куда серьезнее?

— Да, это так. Уже есть случаи выхода из строя земной техники из-за подобных процессов. Магнитные возмущения, которые приходят извне и взаимодействуют с магнитосферой Земли, вызывают значительные колебания геомагнитного поля, а это, в свою очередь, приводит к возникновению индукционных токов и полей в линиях электропередач и газопроводах. Сама ионизирующая радиация приводит к повреждениям и поломкам в аппаратуре спутников. В результате происходит усиленная деградация солнечных батарей, нарушения в системах связи, мобильной сети, GPS-систем.

— Можете ли вы все это предсказать и предупредить о возможных проблемах?

— В принципе да, и это одна из наших задач. Уже есть случаи, когда благодаря подобным предсказаниям космонавты, находящиеся на МКС, перемещались в специальные отсеки, чтобы защититься от таких потоков.

— А ваша техника не ломается от таких космических потоков?

— Нет. Дело в том, что у нас выбран специальный тип газоразрядных счетчиков, которые могут регистрировать потоки заряженных частиц при их увеличении в 10–20 раз. Мы знаем, что потоки, которые придут к нам, будут успешно зарегистрированы, а наша аппаратура при этом из строя не выйдет.

— Насколько исключительны ваши исследования?

— Они уникальны. Наш эксперимент давно вышел за рамки камерного, имеющего значение только для нашей лаборатории или нашего института. Речь идет об исследованиях, важных для всего человечества, поскольку мы охватываем и северные полярные зоны, и Антарктиду, и среднюю полосу. Эти исследования имеют планетарный характер. Однородный ряд экспериментальных данных о потоках заряженных частиц на разных высотах в атмосфере — единственный в мировой науке. Кстати, за исследования модуляционных эффектов в космических лучах и вспышек солнечных космических лучей в 1976 г. ряд сотрудников Долгопрудненской научной станции были удостоены Ленинской премии.

Кроме того, из стратосферного эксперимента вырос другой, не менее крупный и амбициозный эксперимент — *CLOUD* (англ. *Cosmics Leaving Outdoor*

Droplets, «Космические причины, вызывающие образование водных капель»), который проводится в швейцарском *CERN*. В его подготовке участвовало большое число специалистов по атмосферной физике и химии из известных европейских институтов и США. Он начался в 2006 г. и продолжается в настоящее время. Один из важнейших результатов проекта *CLOUD* — всестороннее исследование процесса нуклеации в земной атмосфере. Были разработаны и созданы экспериментальные установки. В частности, наша лаборатория создала годоскоп — набор сцинтилляционных детекторов, систему типа матрицы, которая позволяет получить изображение пучка частиц от ускорителя и измерить его величину. Для регистрации потоков космических лучей и оценки ионизации нами также был разработан и создан детектор космических лучей. Оба детектора до сих пор успешно работают. Ежегодно наши сотрудники выезжают в Швейцарию для проведения запланированных исследований и профилактических работ. Участники проекта регулярно отчитываются перед научным директором *CERN*, причем с точки зрения не только научной работы, но и подготовки молодых научных кадров. Очень важно, что в любом научном проекте, который проводится в *CERN*, должна участвовать молодежь. Для ребят это мотивация, и неудивительно, что многие из них потом остаются в проекте. Наши студенты, к сожалению, не попадают туда по формальным признакам. Хотя талантливых ребят среди наших студентов тоже хватает. Надеюсь, мы к этому тоже потихонечку придем.

— Что нового удалось узнать о нуклеации?

— Одна из химических составляющих, очень важных в земной атмосфере, — серная кислота, которую поставляет сама природа, в том числе антропогенная деятельность. Эти молекулы H_2SO_4 в соединении с молекулами воды дают либо двухкомпонентную нуклеацию частиц, либо, в присутствии других элементов, так называемую многокомпонентную нуклеацию. Один из важных результатов нашего эксперимента показал, что поток заряженных частиц, который поступает в камеру установки *CLOUD*, может в десятки раз увеличить скорость этого процесса. Таким образом, показан эффект влияния заряженных частиц на процесс многокомпонентной нуклеации в земной атмосфере. Чем выше поток заряженных частиц, тем выше скорость нуклеации. Эти работы были представлены на многих высокорейтинговых конференциях, опубликованы в журналах *Nature*, *Science* и др.

— Дают ли ваши исследования дополнительные сведения о возникновении жизни на Земле?

— Это очень интересный вопрос. Напрямую он нами не ставился, но в принципе мы можем ответить, какие существовали потоки частиц в ту или

иную эпоху, какая была ионизация, каковы эффект от этой ионизации и ее влияние на создание условий облачности на Земле, выпадение осадков и т.д. Все это, конечно, могло влиять на возникновение и развитие жизни на нашей планете.

Другой важный международный эксперимент — космический проект *PAMELA* (англ. *Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*) по исследованию антиматерии и астрофизики легких ядер. Его основная задача — получение экспериментальных данных о потоках заряженных частиц: электронов, протонов, различных ядер вплоть до углерода, а также позитронов и антипротонов. В стенах нашей лаборатории был разработан и создан нейтронный детектор, вошедший в состав спектрометра *PAMELA*.

Этот эксперимент успешно выполнялся в околоземном космическом пространстве на борту российского спутника «Ресурс-ДК1» в период с 2006 по 2016 г., то есть в течение десяти лет вместо ожидаемых трех. Спектрометр *PAMELA* все это время находился в космическом пространстве и получил массу уникальной информации о потоках космических лучей, их составе и спектрах. Среди участников этого проекта — научные организации из Италии, Германии, Швеции и других стран. С российской стороны участниками этого эксперимента были Московский инженерно-физический институт (МИФИ), ФИАН и Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург).

— **Какие результаты были получены?**

— Результатов очень много, обо всех рассказать сложно. Но среди самых важных и существенных — впервые в 2009 г. открыт эффект увеличения отношения потока позитронов к потоку электронов с ростом энергии этих частиц (эффект *PAMELA*), впервые в широком интервале энергий измерены энергетические спектры позитронов и антипротонов, спектры протонов, ядер гелия, электронов, а также легких ядер, вплоть до ядер углерода. Спектры частиц, в том числе антипротонов, были измерены с беспрецедентной точностью. Этот эксперимент стал необходимой базой для ряда теоретических работ, объяснения происхождения космических лучей.

Недавно наши результаты были подтверждены экспериментом АМС-02 на Международной космической станции. Вопреки ожидаемому классическому спаду отношения потоков позитронов к электронам с ростом их энергий впервые был обнаружен устойчивый рост этого отношения. До сих пор не имеется удовлетворительного объяснения этого феномена. Одна из возможных интерпретаций связана с темной материей.

Запуск метеозонда с территории
Долгопрудненской научной станции



— **Вы обнаружили темную материю?**

— К сожалению, нет. Вопросы о происхождении «дополнительных позитронов», как и о сущности темной материи, до сих пор остаются дискуссионными.

— **Но если это не темная материя, необходимо другое объяснение?**

— Теоретики пытаются это сделать. В мире выполняется несколько крупных экспериментов по поиску частиц темной материи, но пока безрезультатно.

— **Научная коллаборация PAMELA продолжает свое существование?**

— Да, продолжается обработка данных, полученных в эксперименте за десятилетие, организуются встречи участников эксперимента в России и за рубежом — в Италии, Германии, Швеции. Ученые анализируют данные, готовят материалы для совместных статей. Поток публикаций на эту тему не прекращается.

Следующий крайне важный эксперимент, который также зародился в нашей лаборатории, — так называемый проект «Солнце — Терагерц», который сейчас получил финансирование в виде договора с РКК «Энергия». Основная задача на данном этапе — создать необходимый экспериментальный комплекс для проведения длительных измерений на борту МКС солнечного терагерцевого

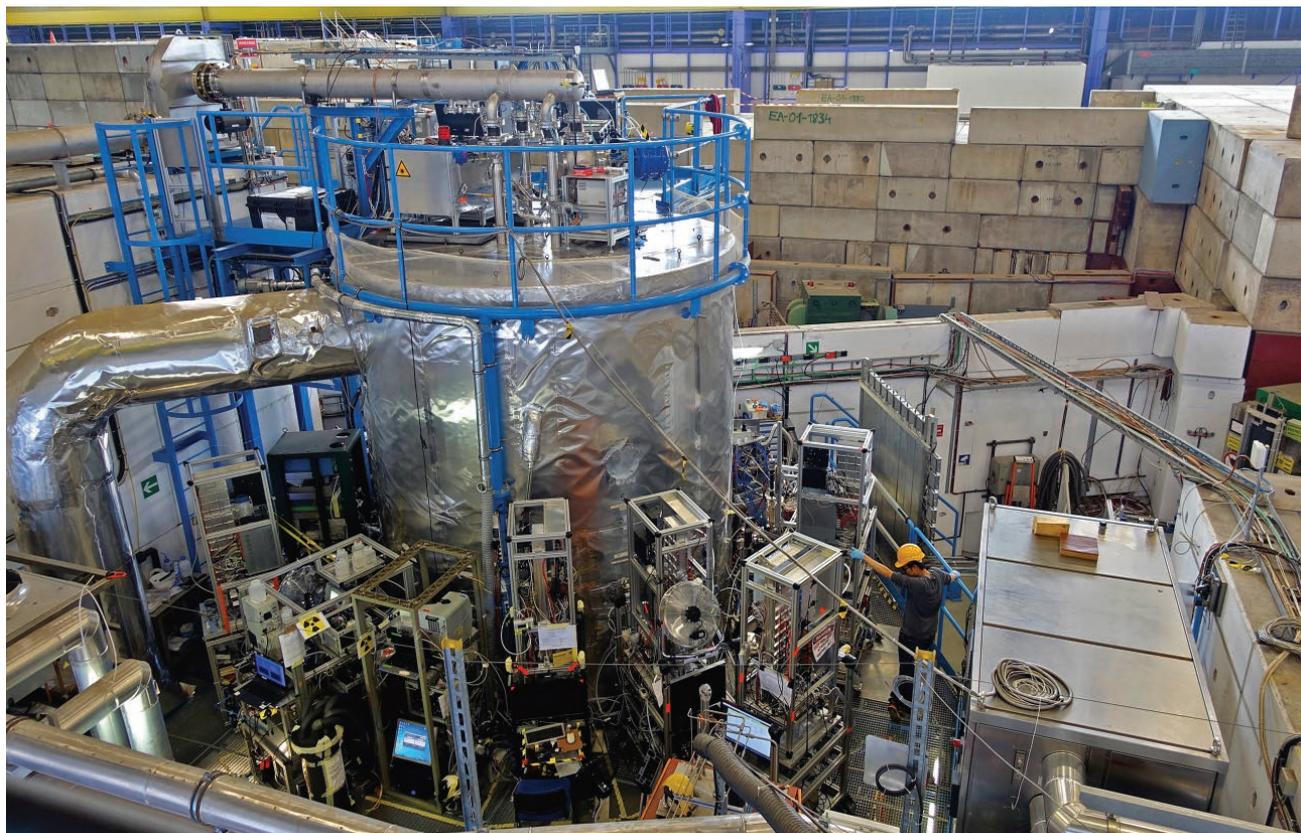
излучения. По сути дела, это будет первый эксперимент, который позволит получить уникальную информацию об излучении Солнца в терагерцевом диапазоне электромагнитных волн, то есть в диапазоне частот от 10^{12} до 10^{14} Гц.

— **Как он будет осуществляться?**

— Мы планируем провести на борту МКС первые исследования радиоизлучения солнечных вспышек в терагерцевом диапазоне. С точки зрения фундаментальной физики это очень интересно, в первую очередь потому, что раньше жизнь нашего светила и солнечных вспышек изучалась в области микроволновых частот, в рентгеновском и гамма-излучении. Спектр микроволнового излучения Солнца известен, он хорошо промеряется современными радиотелескопами, которые находятся на Земле. Практически по каждой вспышке у нас имеется информация в этой области излучения. Однако область излучения выше одного и до десятков терагерц остается покрытой мраком.

— **Почему же нет такой информации?**

— Потому что радиоизлучение в этой области частот очень эффективно поглощается земной атмосферой и не доходит до наземного наблюдателя. Наша физическая фундаментальная задача — получить первую уникальную информацию об излучении Солнца в спокойные периоды



Научный комплекс эксперимента CLOUD в CERN

и во время вспышек, то есть ликвидировать экспериментальный пробел, который сейчас существует в мире. Проект должен быть запущен в 2022 г., а до этого нам нужно подготовить всю научную аппаратуру.

— Подобные исследования будете проводить только вы? Или в мире есть что-то аналогичное?

— Могу сказать однозначно: в этом направлении не работает ни одна научная аппаратура ни на Земле, ни в космосе. Мы, думаю, станем первыми.

— Но ведь это будет совершенно новая картина мира!

— Совершенно новая. По крайней мере, мы увидим важные моменты, которые прольют свет на многое из того, что сегодня непонятно или неизвестно. В частности, модель солнечной вспышки до сих пор не закончена. Там есть вопросы, которые пока трудно понять. Появление новых данных позволит посмотреть по-другому на механизм ускорения заряженных частиц, ответить на вопрос, на каких высотах в атмосфере Солнца какие процессы разыгрываются, каков основной физический механизм разогрева солнечной короны и т.д.

— Какую аппаратуру вы создаете в рамках этого проекта?

— Сейчас мы создаем прибор с восемью детекторами, которые позволят промерить эту терагерцевую область. Для его создания необходима разработка механической модели, которую мы должны просчитать с точки зрения реальных тепловых нагрузок. Вы знаете, что Солнце светит и греет, соответственно, прибор должен у нас не сильно нагреваться и не сильно остывать. Он должен быть механически устойчив для перегрузок, выдерживая ускорения до 20 g. Это учитывается при разработке и моделировании научной аппаратуры во избежание ее разрушения по мере подъема на орбиту. Это непростая инженерная задача, над которой мы работаем. Наш прибор будет установлен снаружи МКС на служебном модуле, чтобы смотреть на Солнце. Мы должны его подготовить, провести контрольные испытания перед взлетом, дальше прибор должен быть доставлен на МКС, где космонавты его примут, проверят, включают, после чего аккуратно вынесут со станции, установят на определенной лабораторной платформе и подключат информационные кабели. Тогда мы будем иметь данные в непрерывном режиме. Эта информация будет передана на Землю, и мы приступим к экспресс-анализу. С нетерпением ждем этого момента. Если мы все это успешно сделаем, то в дальнейшем получим возможность создания терагерцевых матриц, которые будут смотреть не только на Солнце, но и на все галактические объекты, например на остатки сверхновых звезд, с которыми также связано немало загадок.

— Знаю, этим ваши проекты не исчерпываются.

— Да, если говорить о международных проектах и коллаборациях, у нас существуют экспериментальные работы, которые мы проводим в рамках прямых соглашений. Это, например, Пресвитерианский университет Маккензи в Бразилии, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева в Казахстане, Национальный научно-технологический центр в Саудовской Аравии, который также заинтересовался нашими исследованиями и научными приборами. Мы готовим совместные статьи для публикаций и представления на научных конференциях.

Есть также проекты, которые проводятся в рамках Международного института космических исследований (ISSI) в Швейцарии. Основная задача этого института — создать международные группы, чтобы они смогли вместе поработать в рамках определенной научной задачи. В течение последних лет мы работаем над двумя проектами, которые были приняты и утверждены этим институтом. Первый проект — исследования процесса высыпания магнитосферных электронов, то есть того самого эффекта, который мы видим в нашем стратосферном эксперименте. Второй проект посвящен изучению солнечных вспышек. Участники этих проектов кроме ФИАН, СПбГУ и НИИЯФ МГУ — ученые из Германии, Швейцарии, Финляндии, США, КНР и др. Здесь мы также используем свои экспериментальные данные, которые получили в стратосфере, и тоже ждем интересных результатов.

— Владимир Салимгереевич, как вы успеваете участвовать в таком количестве экспериментов? Как я понимаю, станция у вас небольшая, сотрудников не так много...

— Это не просто. Вероятно, вы не поверите, если я скажу, что мы работаем без выходных и праздников, но это правда. Похвастаться отличным базовым финансированием тоже не могу. Наверное, секрет в том, что у нас собрались большие энтузиасты, по-настоящему влюбленные в свое дело. Три сотрудника нашей лаборатории, в том числе я, преподаем в МФТИ (Физтехе), расположенном по соседству. Проводим занятия и заодно стараемся подобрать толковых ребят, которые заинтересованы наукой. Сейчас у нас работают три студента, один уже окончил аспирантуру и скоро должен защищать свою научную работу.

Нам интересно то, чем мы занимаемся. Мы верим в то, что наука — это главный двигатель развития человечества. Вслед за создателем гелиобиологии А.Л. Чижевским считаем себя детьми не только планеты Земля, но и Солнца, и всего космоса, который терпеливо ждет своих исследователей. ■

Беседовала Наталья Лескова



2



1



4

МЕДИЦИНА

ФАБРИКА ЗДОРОВЬЯ

3



Боткинская больница — одна из самых известных в Москве. Ей более 100 лет. Построена была, как в те годы считалось принятым, на частные пожертвования — и сразу с прицелом стать одной из лучших в Европе. И сегодня сюда стремятся попасть все нуждающиеся в качественном лечении, поскольку Боткинская — это всегда знак качества. Как больнице удастся долгие годы сохранять лидирующие позиции в столичном здравоохранении — наш разговор с главным врачом больницы, главным хирургом Москвы, заведующим кафедрой хирургии РМАНПО, членом-корреспондентом РАН **Алексеем Васильевичем Шабуниним.**

На цветных фотографиях:

1. Операцию проводит А.В. Шабунин
2. Оттачивание офтальмологических навыков
3. Обучение хирургическим навыкам
4. Обучение хирургов на симуляторах

На черно-белых фотографиях:

слева — С.П. Боткин,
справа — К.Т. Солдатенков

— **Алексей Васильевич, Боткинская больница, которую вы возглавляете, родилась 108 лет назад, в декабре 1910 г. Основатель ее — московский купец Козьма Солдатенков, именем которого она называлась до 1920 г., а потом стала Боткинской, хотя лейб-медик Сергей Боткин здесь никогда не работал.**

— С.П. Боткин был первым русским лейб-медиком. До него эту должность занимали немецкие профессора. Действительно, в 1920 г. по каким-то причинам Совет народных депутатов переименовал Солдатенковскую больницу в Боткинскую. С тех пор мы гордо носим имя великого русского врача-терапевта С.П. Боткина, первого российского лейб-медика императорской семьи.

Сергей Петрович был выдающимся врачом, но мы помним и о том, что К.Т. Солдатенков пожертвовал на строительство этой больницы 2 млн золотом: по тем временам это огромная сумма, в пересчете на сегодня — более 4 млрд рубл. Он хотел, чтобы здесь появилось самое современное по тем временам медицинское учреждение, где оказывали бы помощь «без различия званий, сословий и вероисповедания». Мы эти принципы стараемся соблюдать и сегодня — быть лучшими и доступными для всех нуждающихся. У нас получают самую современную медицинскую помощь тысячи москвичей независимо от звания, сословия и религии.

Боткинская больница всегда объединяла лучших врачей, педагогов, и вне зависимости от смены эпох и политического строя врачи делали все, чтобы спасти человеческие жизни.

— **Давайте вспомним врачей, которыми вы особенно гордитесь.**

— В истории Боткинской больницы много выдающихся врачей. Это прежде всего профессор Ф.А. Гетье, первый главный врач Боткинской больницы, который контролировал строительство и ввод в эксплуатацию. А перед тем как строить больницу, он объездил весь мир, чтобы взять на заметку все самое передовое и лучшее. Профессор В.Н. Розанов, главный хирург Боткинской больницы, стал прототипом профессора Преображенского в «Собачем сердце» Булгакова. Именно он оперировал Ленина и Сталина. У нас в больнице есть палата Ленина, где он лежал после того, как В.Н. Розанов извлек у него пулю.

— **Палата — тоже часть музейной экспозиции?**

— Да, мы ее сохранили как мемориальную, постарались оставить в ней все, как было в те годы. До сих пор история болезни «вождя мирового пролетариата» вызывает споры и разногласия специалистов. С отравлением, я полагаю, это элементы фантазии, но пуля была, ее удалили, это факт. Мы бережно храним многие исторические документы. Например, у нас есть мандат профессора Ф.А. Гетье, который подписал Ф.Э. Дзержинский. Имеется



Член-корреспондент РАН А.В. Шабунин

записка И.В. Сталина, и с ней связана интересная история. Когда он пришел с А.И. Микояном проводить М.В. Фрунзе, который здесь лечился, В.Н. Розанов их не пустил. Представляете, врач не пускает руководителя государства, потому что поздно пришел. Профессор В.Н. Розанов был гениальным хирургом, и я имею честь возглавлять кафедру хирургии, которую он создавал. Мы сегодня не только поддерживаем направления, которые исторически были в Боткинской больнице, но и развиваем хирургию по всем высокотехнологичным векторам развития.

Говоря о великих боткинских врачах, следует сказать о профессоре Е.А. Дамир. Это анестезиолог номер один в Советском Союзе, первый сертифицированный специалист, появившийся в нашей стране. Именно с нее начинала развиваться эта новая специальность, без которой сегодня немислимо развитие медицины.

— **Неужели до прихода Елены Алимовны не существовало анестезиологии?**

— Как науки не существовало. В основном применялась местная анестезия, и это было колоссальным тормозом для развития хирургии. Это не позволяло выполнять сложнейшие вмешательства, что приводило к серьезным негативным последствиям. Елена Алимовна Дамир совершила прорыв, за что мы, хирурги, снимаем шляпу перед ней и помним ее всегда.

— Для нас это особенно значимая фигура: Елена Алимовна была сестрой Татьяны Алимовны Дамир, жены Сергея Петровича Капицы, многолетнего ведущего телепередачи «Очевидное — невероятное», основателя и первого главного редактора журнала «В мире науки».

— Конечно, все мы помним Сергея Петровича — ученого, просветителя, популяризатора науки.

Боткинская больница, если продолжать рассказ о ее истории, — это первая в Советском Союзе реанимация, это выдающийся реаниматолог профессор В.А. Неговский. Реанимация, которая у нас была создана, тоже совершила качественный прорыв. В частности, здесь заработала первая барокамера в практическом здравоохранении.

Мы гордимся нашими великими врачами, но стараемся развиваться и сегодня. У нас действуют 1,8 тыс. коек. Мы полностью переоснастили диагностическую и лечебную технику и оборудование. Мы обучили наших врачей в лучших мировых практиках и продолжаем это делать. Только за три последних года более 100 врачей и медсестер Боткинской больницы прошли стажировку в Германии, Израиле, Франции, США. Сделаны серьезные шаги вперед.

— Что такое сегодня Боткинская больница?

— В 2017 г. наши 1,8 тыс. коек означали 5% коечной мощности Москвы. На них мы пролечиваем с каждым годом все больше пациентов с лучшими результатами. Сегодня стационарное лечение получают более 100 тыс. пациентов в год и более 1 млн амбулаторных пациентов. Это уже 8% от всех пациентов Москвы. На нашей базе работают 24 кафедры четырех медицинских вузов и двух федеральных центров. Такого нет ни в одной больнице. На нашей базе работают более 100 профессоров, пять членов Российской академии наук, четыре действительных и ваш покорный слуга — член-корреспондент РАН, 240 кандидатов медицинских наук и доцентов. Причем половина из них заняты и на кафедре, и в больнице. Это самый большой научно-практический потенциал в Москве. 54 операционных, где ежегодно выполняется более 67 тыс. операций под наркозом. В Боткинской больнице сегодня работают девять московских городских специализированных центров, в частности гематологический и нефрологический.

— А еще у вас находится крупнейший в Москве симуляционный центр.

— Да, три года назад мы сделали колоссальный прорыв, когда правительством Москвы было принято стратегическое решение об организации на базе Боткинской больницы Городского медицинского симуляционного центра. Мы создали его по типу виртуальной многопрофильной клиники. За три последних года 26 тыс. московских медиков прошли стажировку на базе центра. Почему это для нас серьезный шаг вперед? Потому что мы не только продолжили применение современных технологий, но и начали транслировать их нашим коллегам. Все это дает свои результаты.

— Алексей Васильевич, с каждым годом вам удастся принять все большее количество пациентов. За счет чего?

— Есть три основных вектора развития, прежде всего хирургии. Это внедрение малотравматичных способов лечения — лапароскопической хирургии, эндоскопических способов лечения и рентгенхирургических технологий. Сегодня эндоскопия перестала быть диагностической: при помощи эндоскопа мы выполняем по-настоящему жизне-спасительные хирургические операции.

Вот, например, тяжелый контингент больных с острой кишечной непроходимостью. Мы до последних лет были вынуждены оперировать этих пациентов по жизненным показаниям. И такие операции завершались в большинстве случаев формированием противостоического заднего прохода (*anus praeternaturalis*). Сегодня наши коллеги-эндоскописты проводят стентирование толстого кишечника, когда в сдавленную опухолью кишечную стенку устанавливается стент, наподобие того как стентируют коронарные сосуды в случае инфаркта. Таким образом разрешается непроходимость. Пациент из тяжелого экстренного трансформируется в планового. Эта технология открывает путь для следующей малотравматичной операции. Мы оперируем этих пациентов лапароскопическим путем — резецируем пораженную опухолью часть кишки и формируем интеркорпоральный анастомоз. Пациент в результате получает выздоровление от тяжелого онкологического заболевания, имея всего несколько небольших проколов.

Рентгенхирургия — следующий вектор. Наши врачи, которые давно уже спасают пациентов с инфарктами и инсультами, сегодня здесь просто творят чудеса. Это экстренная хирургия, лечение травм печени, селезенки.

Берем тяжелую травму печени, внутрипеченочную гематому. Еще несколько лет назад мы были вынуждены оперировать этих пациентов, когда гематома увеличивалась в размерах. Мы рассекали здоровую ткань печени, чтобы внутри органа найти поврежденный сосуд. Сегодня мы этих пациентов подаем в рентгенхирургическую операционную, где проводится эмболизация — и все, человек здоров.

— Это, наверное, наиболее близкая вам тема, потому что вы гепатолог по специальности. Когда-то начинали на Кузбассе, руководили гепатологическим центром. Можно сравнить те операции и эти?

— Разница колоссальная, и не только в новых возможностях хирургии, но прежде всего — в быстром восстановлении пациентов. К сожалению, у меня получается только два операционных дня в неделю, хотя хочется намного больше. Это два моих счастливых дня.

— Чем еще гордитесь?

— В последние пять лет в Боткинской больнице мы снизили летальность от инфарктов с 16% до 6%, когда пациента сразу подаем в операционную и проводим стентирование. Такие операции стали рутинными. В лечении пациентов с инсультами сегодня сделан прорыв. Несколько лет назад мы начали проводить тромболитис, а год назад впервые внедрили тромбоэкстракцию, когда у больного с инсультом при поступлении в рентгенооперационной удаляется тромб. Вы знаете, я не мог поверить своим глазам, когда мне показывали этих пациентов.

— Не верили, что это одни и те же люди?

— Да. Когда он поступает, у него паралич, афазия, он не разговаривает. Тяжелый инвалид. Проводится тромбоэкстракция, удаляются тромбы, и на следующий день, когда он выходит из наркоза, — это здоровый человек. Ну, почти здоровый.

— Почему почти?

— Потому что инсульт — это всегда тяжелый диагноз, перенести его и просто забыть нельзя. Надо

наблюдаться у врачей, следить за артериальным давлением, вести правильный образ жизни — словом, прежней ваша жизнь уже не будет. Иначе велик риск повторного инсульта. Важно, чтобы это хорошо понимали все пациенты. Мы стараемся не просто спасти и вылечить человека, но и убедить его в том, что он в ответе за свое здоровье. И если мы извлекли тромб, дали пациенту рекомендации — принимать препараты, разжижающие кровь, следить за давлением и т.д., — он должен их выполнять. Тогда мы сообщаем достигнем нужного результата.

— А ведь это касается не только инсульта, но и вообще всех состояний, которые вы беретесь лечить.

— Сегодня врачи могут многое, иногда результаты просто фантастические, но все эти чудеса могут происходить только с участием самого пациента, если он борется за свое здоровье вместе с нами.

Несколько слов хотелось бы сказать и о диагностической базе больницы, которая также уникальна. Это семь компьютерных томографов, четыре МРТ, четыре ангиографа... Это действительно очень важно, потому что мы сегодня можем быстро и точно ставить диагнозы. Мы применяем малотравматичные методы лечения, которые позволяют пациенту максимально быстро восстанавливаться. Это к вашему вопросу — за счет чего мы стали быстрее лечить.

— То есть мы не должны думать, что вы начали выписывать недолеченных людей?

— Ни в коем случае. Тут крайне важен также наш огромный научный потенциал. Пройдусь



Проведение виртуальной лапароскопической операции

широкими мазками по нашим клиникам. Клиника урологии, которой руководит академик О.Б. Лоран. Это ведущая урологическая клиника страны. Причем вот что ценно. Наши заведующие кафедрами — еще и руководители клиник. Это интеграция науки и практики. Например, кафедра хирургии, где все профессора и доценты — сотрудники больницы. Кафедра нейрохирургии — это более 1,5 тыс. операций на головном мозге. Кафедра травматологии и ортопедии, Московский городской центр эндопротезирования — 2 тыс. эндопротезирований в год. Наша клиника травматологии — это центр компетенции по тяжелой сочетанной травме. Пациенты с тяжелыми переломами таза — это те, которые раньше

вынуждены были находиться на больничной койке более шести месяцев. Сейчас мы оперируем их, собираем раздробленный таз, как ожерелье, на металлических конструкциях. И пациент на следующий день встает.

А наш Московский гематологический центр — это 35 тыс. пациентов с раком крови ежегодно. Академик А.Г. Румянцев — идеолог нашей боткинской гематологии, внедрение высокотехнологичных и суперсовременных протоколов позволило нам увеличить пятилетнюю выживаемость больных хроническим миело- и лимфолейкозом до 85%. Это очень серьезные цифры. И это реально спасенные люди.

— Алексей Васильевич, а какие у вас есть свои разработки, авторские оперативные технологии?

— Клиника хирургии Боткинской больницы занимается всеми направлениями — это и экстренная, и плановая хирургия, и онкология. Онкология, к сожалению, занимает все больше пространства в нашей работе. И мы научились уже много лет назад выполнять самые сложные резекции печени, удаляя половину, две трети печени. Но по статистике мы чаще сталкиваемся с ситуациями, когда опухоль достигает столь больших размеров, что резекция возможна технически, но невозможна практически.

— Что это значит?

— Технически мы можем резецировать пораженную часть печени, но остающейся части печени не хватает для того, чтобы пациент выжил. И тогда мы разработали специальную методику: мы проводим при помощи наших коллег — эндоваскулярных рентгенхирургов эмболизацию пораженной опухолью части печени, вводим в сосуды специальный химиопрепарат, который действует на опухоль, а за это время в течение месяца остающаяся левая доля печени увеличивается в два — два с половиной раза. Печень регенерирует. Таким образом мы переводим пациента из статуса неоперабельного в операбельного и после этого выполняем резекцию печени.

Мы исследовали этот феномен и разобрались, в чем же причина того, что печень так быстро регенерирует. Дело в том, что увеличивается кровоток. При помощи ОФЭКТ-КТ мы разработали уникальную методику определения остающейся функционирующей части печени. При этом четко распределили большие, чтобы понять, кому именно такая методика выращивания печени показана.

— Потрясающе! Такие операции вы, наверное, и делаете в эти два своих счастливых дня в неделю?

— Да, это самые сложные и самые интересные операции.

Следующая ситуация — опухоль поджелудочной железы. Мы знаем, что в онкологии лучших результатов удастся достичь, когда сочетаются все виды лечения — лучевая терапия, химиотерапия

и резекционные способы. Но применить их у пациентов с опухолью поджелудочной железы до последнего времени было невозможно.

В нашей клинике была разработана эта технология, и мы назвали ее «гибридные способы лечения больных раком головки поджелудочной железы». При поступлении мы проводим химиоэмболизацию пораженной опухолью части поджелудочной железы, через некоторое время подаем больного в операционную, выполняем резекцию пораженной части и тут же, в завершение операции, проводим интраоперационную лучевую терапию. То есть во время одной госпитализации все три стрелы онкологии направлены на выздоровление пациента. Это позволило реально увеличить продолжительность жизни.

— Этот пример — тоже из области интеграции науки и практики.

— Именно так. Наши коллеги разработали уникальную методику стентирования при опухолевой непроходимости толстого кишечника. Мы внедрили эту методику не только у себя, а через симуляционный центр по Москве. Мы маршрутизировали пациентов с опухолевой непроходимостью не во все больницы, как это было раньше, а в десять больниц, где владеют этими методиками — стентированием и лапароскопией. Мы обучили эндоскопистов методике стентирования, но практика без науки не бывает. Хотя говорят, что хирургия — это не наука.

— Кто так говорит?

— Есть такие люди, в том числе и среди врачей. Какие, дескать, хирурги ученые? Они там что-то шьют, режут. Но и сегодня, и во все времена хирургия заставляет думать, а не просто оперировать.

— Мало того, хороший хирург стремится к тому, чтобы как можно меньше резать. Лучшая хирургия — это минимальная инвазивность.

— Да, хороший хирург — не тот, кто хорошо прооперировал, а тот, кто вылечил без операций. Лучшая операция — это отсутствие операции. Парадоксально, но факт. И если операция необходима, то выполнить ее нужно наименее травматично. Вот для этого нам и нужна наука.

Но хирургия — это не только наука. Это еще и искусство. Искусство высочайшего уровня! Вот мы получили научно разработанную технологию стентирования. Но как долго держать этот стент? Когда прооперировать больного? Мы провели впервые в России исследования на эту тему. Мы изучили, что же происходит с кишечной стенкой в первые семь дней, во вторые семь дней, и поняли на основании электронной микроскопии, гистологического исследования, МРТ, КТ, что оптимальный срок для лучшего применения следующей технологии — лапароскопической резекции — составляет 21 день. Именно в этом и есть интеграция науки и практики: мы не просто применяем все,

что увидели, а преломляем это через собственную призму научной и практической работы. А искусство в том, чтобы все это осуществить красиво, изящно, безболезненно.

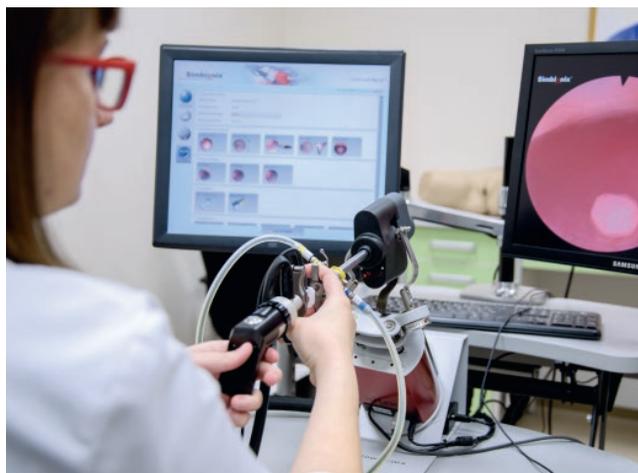
— **Хочу вас спросить как главного хирурга Москвы: что вас беспокоит больше всего в состоянии хирургической отрасли?**

— Москва показывает в последние годы реальные изменения в положительную сторону. И это случилось не просто так. У нас 1,5 тыс. хирургов в Москве в системе Департамента здравоохранения. Наши доктора направлялись на стажировки, проходили практику в лучших мировых научных центрах. Например, в последнее время мы дружим с Южной Кореей. Она показала еще большее чудо, чем было у японских коллег. Их развитие настолько молниеносное и поражающее, что мы, направляя туда хирургов, уверены в результате. Корейский хирург берет нашего доктора за руку в семь утра и выпускает ее только поздно вечером. И наш доктор две недели находится с ним безотрывно — в операционной, на консультативном приеме, на консилиуме. Мы получили от этого желанный результат. Наши врачи стали возвращаться и говорить: закупите нам это, мы хотим вот эту методику.

— **Закупают? Нет с этим проблем?**

— С этим всегда есть проблемы, во всем мире, потому что хирурги хотят большего, чем есть на самом деле. Мы в нашем симуляционном центре обучили более половины московских хирургов методикам лапароскопической и роботической хирургии. Результат не замедлил себя ждать. В 2014 г. процент лапароскопических операций составлял чуть больше 30, а после этих шагов в 2017 г. он увеличился до 64,5. В 2018 г. мы перевалили рубеж 70%.

— **А что за хирургическая технология дневно-стационара у вас внедрена?**



Занятие на симуляторе в виртуальной клинике гинекологии

— Мы поехали в Швейцарию в стационар кратковременного пребывания — специально, чтобы перенять эту технологию. На конференциях мы слышали от наших скандинавских коллег, что у них 80% больных оперируются в стационаре одного дня. Но, честно говоря, мы не поверили.

Приехали — в самом деле так. Конечно, это легкие пациенты, которые не требуют длительной госпитализации. Но по статистике они занимают большее количество коек. Разумеется, швейцарские врачи тоже сохранили сложные ситуации в обычном — круглосуточном — стационаре, но грыжи, холециститы, липомы, весь этот обширный пул заболеваний оперируется в стационаре одного дня.

В 2017 г. мы открыли в Москве стационары краткосрочного пребывания. В 2018 г. в них выполнено более 18% всех операций. Причем, и это принципиально, мы это сделали только на базе многопрофильных больниц. Потому что, если что-то случается, а в хирургии нужно быть всегда к этому готовыми, пациент сразу перемещается на круглосуточную койку. Здесь есть вся диагностическая круглосуточная служба. Это действительно уникальный проект, очень важный для пациентов прежде всего трудоспособного возраста и экономически значимый для лечебного учреждения.

— **У нас все разговоры с вами, что вполне естественно, вокруг хирургии. Однако больница ваша имеет не только хирургические отделения. Давайте скажем несколько слов о том, что есть уникального и интересного в этом плане.**

— Отличие Боткинской больницы от любой другой в том, что в ней представлены все направления медицины, которые только имеются на сегодня. Это и терапевтическая служба, и мощная кардиология, и региональный сосудистый центр, нефрология, пульмонология...

Сейчас мы привели в порядок все старые корпуса больницы. В четырех из них осуществляется капитальный ремонт. В следующем году к нам переезжает офтальмологическая клиника, которая трансформируется в Московский городской офтальмологический центр. А вообще ушедший 2018 г. для нас был просто уникальным.

— **Чем же?**

— В апреле впервые в истории Российской академии наук состоялся выездной пленум отделения медицинских наук на базе Городской клинической больницы им. С.П. Боткина. Около 100 действительных членов академий приехали к нам, познакомились с работой больницы. Их по-настоящему удивил тот научный потенциал, которым мы располагаем. Академией было принято постановление о том, что Боткинская больница готова для внедрения следующего медицинского направления — трансплантации органов. В июне в больнице были выполнены первые трансплантации

почки и печени. За пять прошедших месяцев мы выполнили 25 трансплантаций почки и десять — печени. Это мощный старт. Наши коллеги-трансплантологи удивляются и по-хорошему завидуют.

— **Вы сами проводили трансплантации?**

— Да, и это удивительные ощущения. Я 30 лет работаю хирургом и всю жизнь резецирую жизненно важные органы, удаляю половину или две трети пораженного опухолью органа. В лучшем случае — когда кишечник резецировал и сшил. Здесь же технологии граничат с чудом. Ты берешь холодную, серую, безжизненную донорскую печень, вшиваешь все сосуды и желчные протоки (а печень, как губка, вся состоит из сосудов и желчных протоков), пускаешь кровотоки — и она на глазах меняет цвет, у тебя в руках становится теплой. Из желчного протока начинает капать желчь. Это в самом деле необыкновенное чувство.

— **Вы, наверное, ощущаете себя творцом? Так и хочется сказать: да будет жизнь!**

— Это волшебство — новая жизнь. Счастье для хирурга. Но подготовка была кропотливой и долгой. Наши доктора стажировались в лучших московских и зарубежных клиниках. Важно, что старт дан в многопрофильной больнице. В мире уже доказано, что именно в многопрофильных клиниках это приносит лучшие результаты. Мы стартовали сразу по четырем направлениям: почка, печень, роговица, костный мозг. На сегодня у нас уже сделано 79 роговиц и десять пересадок костного мозга.

— **Как все эти пациенты сейчас себя чувствуют?**

— Самое главное — они все живы. С печенью все прошло великолепно. С почкой — это всегда сложные соматические больные, с диабетом, но результаты тоже хорошие. Витальных осложнений мы не получили ни в одном случае. И что очень важно — мы не приглашали внешних специалистов. Начиная с первых трансплантаций и по нынешний день мы все делаем сами. А еще одна важная вещь про 2018 г. — это чемпионат мира по футболу.

— **Какое отношение вы к нему имеете?**

— Дело в том, что мы были назначены уполномоченной больницей. Профессор Эфраим Крамер, главный медицинский инспектор FIFA, объездил все больницы Москвы и сказал: Боткинская.

— **А по каким критериям он выбирал?**

— Он врач-реаниматолог. Мы его привели к себе в реанимацию, где у нас поток со скорой помощи с язвами, кровотечениями, перфорациями. Он посмотрел, заглянул в каждое укромное место и принял решение. И за чемпионат к нам поступило более 400 спортсменов, членов FIFA, болельщиков. Случаи были и самые сложные, и самые курьезные.

— **Расскажите.**

— Например, гражданка Нигерии, которая так активно болела за свою команду, что у нее

начались преждевременные роды. Она родила в нашем родильном доме, назвала сына Иваном. Но на этом все не закончилось. Как выяснилось, она специально приехала рожать в Москву, у нее денег нет, и наша молодая доктор забрала ее к себе домой. Мы ее спрашиваем: «Зачем ты это сделала?» А она: «Ну ей же негде жить». В итоге мы через посылку еле отправили их домой, в Африку.

Гражданин Великобритании, болельщик — тяжелейший инсульт. Проведена тромбозэкстракция. Жизнь спасена. Польский гражданин с инфарктом в клинической смерти, то же самое — в операционную, стентирование — жив, здоров. И так 400 пациентов.

— **И все живы?**

— Конечно. Когда профессор Крамер посещал тяжелых пациентов, он сказал нам много приятных слов и рекомендовал представителям Катара, где пройдет следующий чемпионат мира, приехать к нам, чтобы перенять наш опыт. Они уже были у нас, смотрели, учились.

— **Ваши доктора во время ЧМ говорили по-английски?**

— По-английски — это само собой. Но были также доктора, которые говорили и на других языках. То есть мы сделали все для того, чтобы чемпионат мира с медицинской стороны прошел на высочайшем уровне. И это у нас получилось.

— **Как интересно и неожиданно узнавать о медицинской стороне чемпионата мира. Если бы вас попросили сформулировать, чем уникальна Боткинская больница, что бы вы сказали?**

— Прежде всего, это люди. Это четырехтысячный коллектив профессионалов высочайшего класса. В Боткинской больнице всегда собирались врачи, преподаватели, но вот эта интеграция науки и практики дает особенно ценные результаты. Научные труды сотрудников клиник Боткинской больницы по-настоящему служат примером эффективного внедрения идеологии и методологии доказательной медицины в практическое здравоохранение. Стены Боткинской больницы, где уже более 100 лет лечат людей, — это не просто стены. Их, как атланты и кариатиды, держат наши врачи, медицинские сестры, чтобы спасти человеческие жизни. Ну а то, что в Боткинской больнице есть все направления медицины, — лишь следствие интеграции науки и практики.

Я счастливый человек, мне повезло, что я уже около 20 лет работаю в Боткинской больнице. В ней есть особый дух. Она не верит словам, а верит делам. Сохраняет память о тех врачах, которые посвящают себя спасению людей, других она сюда просто не пускает. Это особенное внутреннее состояние. Не знаю, как это назвать, но это — великая больница. ■

Беседовала Наталья Лескова



БИОПЛОМБА на легкое

На столе перед **Тимофеем Евгеньевичем Григорьевым**, заместителем руководителя по научной работе Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий, лежат необычные конструкции различных окрасок и форм: одни напоминают лейкопластырь, другие — вставки в обувь, чтобы она не портилась и не меняла размер при хранении. «Отчасти это так и есть, — улыбается Т.Е. Григорьев. — Только вставлять их надо не в обувь, а в плевральную полость человека, чтобы помочь ему восстановиться после различных операций и заболеваний». Разработка «умных» биосовместимых материалов — одна из амбициозных задач, которой занимаются в лаборатории полимерных материалов отдела нанобиоматериалов и структур.

— Правильно ли я понимаю, что вы здесь работали некую искусственную легочную ткань?

— Не совсем. Этот материал помогает хирургам при операциях на легких. Легочная ткань — это очень сложная альвеолярная структура. Мы же делаем пористый материал, который при некоторых операциях — например, резекции легкого в случае туберкулеза или при раке легкого — может правильно придавить легкое в ходе той или иной хирургической манипуляции.

— Зачем это нужно?

— Часто после туберкулезной болезни, когда ее уже долечили, остаются так называемые каверны. Это полости в легком, в которых размножаются микобактерии туберкулеза, что и становится причиной его прогрессирования. Противотуберкулезные препараты плохо проникают через плотную стенку каверны. И если их не свести вместе, рано или поздно туберкулез вернется — рецидивирует. Легкое, к сожалению, не сошьешь и не склеишь. Поэтому пульмонологи — специалисты, которые занимаются легочными болезнями, — разработали методику сдавливания легкого в нужном месте, чтобы края каверны сошлись. Таким образом происходит сращивание. Примерно такой же материал нужен для того, чтобы не дать легкому перерастянуться после резекции, когда оно занимает весь объем плевральной полости, а это опасно. Часто в ходе таких операций удаляют достаточно большие объемы, например, 500–600 см³ легочной ткани. И вот тут как раз этот материал незаменим.

— Неужели до вас никто не придумал ничего подобного?

— Использовались материалы биологического происхождения, которые отличаются хорошей биосовместимостью, но они быстро рассасываются, и этих сроков оказывается недостаточно для

оказания лечебного эффекта. Сейчас с этой целью используют силиконовые грудные импланты. Но с ними проблема — они тяжелые, давят на легкое, их нужно как-то фиксировать. Они не биоразлагаемы и в отдаленной перспективе дают негативные результаты.

— Отторжение?

— В том числе. Поэтому наша задача — сделать материал достаточно легким, при этом он не должен промокать, чтобы не набирать массу, обладать способностью биорезорбироваться и замещаться соединительной тканью. Это будет не ткань легкого, но ткань, которой организм восполнит этот недостающий объем. При этом очень важно, чтобы он не создавал пролежни и соответствовал окружающим тканям по биомеханическим характеристикам. Ведь рядом крупные сосуды, недалеко до сердца. Поэтому, если он вызовет пролежень сосуда, это будет фатально для пациента.

— Непростая задача. Кто конкретно перед вами ее поставил?

— Эту работу мы ведем с врачами из Национального исследовательского медицинского центра фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний. Всю часть работы по биосовместимости и вопросам внедрения мы решаем совместно с Национальным медицинским исследовательским центром трансплантологии и искусственных органов. Крайне важно, чтобы задачу формулировали именно врачи.

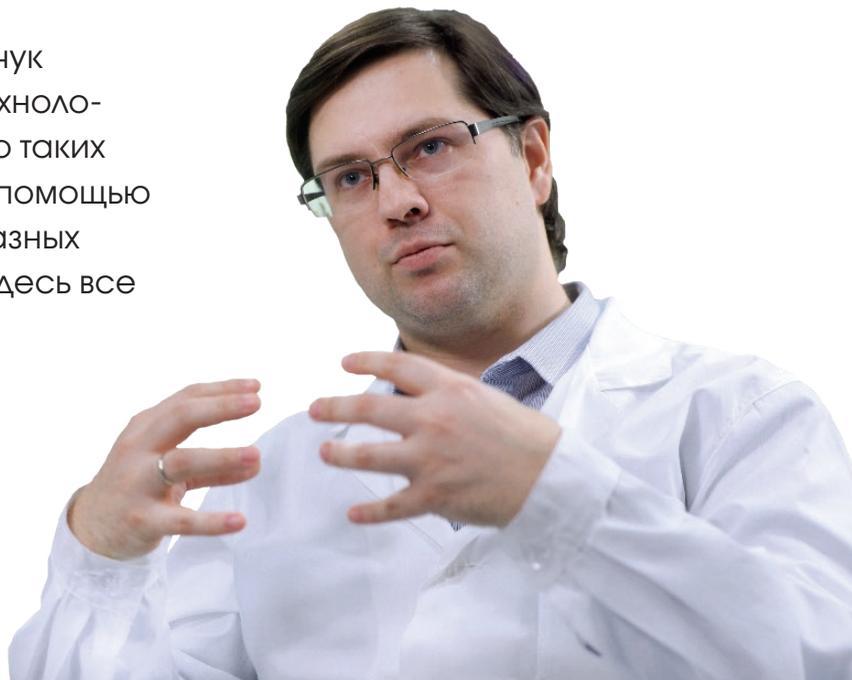
Мы исследовали множество самых разных вариантов. Зачастую материалы, которые сейчас лежат перед вами, проходят много сложных тестов, но самый верный инструмент, которым мы испытывали эти импланты, — руки хирурга.

— Какие исследования вы проводили?

— Мы подбирали что-то похожее на легочную ткань, оцифровывали на разрывных машинах,

Сама идея, с которой М.В. Ковальчук создавал наш комплекс НБИКС-технологий, нацелена на решение именно таких междисциплинарных вопросов с помощью конвергенции, слияния, работы разных технологий на единый результат. Здесь все для этого создано

Кандидат физико-математических наук Т.Е. Григорьев



а затем, меняя свойства, должны были сохранять самое важное. Практика показывает, что этот подход работает. Кроме того, мы обязательно привлекаем к работе клеточных биологов, чтобы понимать, как поступить с материалом, каким он должен быть, чтобы не было хронического воспаления и чтобы уменьшить реакцию на имплантацию.

— **Расскажите, что собой представляет разработанный вами материал.**

— Вы видите некоторые его образцы. Вот, например, материал, который изготовлен по форме плевральной полости. Мы взяли данные компьютерной томографии, распечатанные на 3D-принтере, изготовили специальную заливочную форму, затем туда залили раствор и сформовали его таким образом, что у него всего лишь 3–4% полимера, все остальное — воздух, поэтому он очень легкий.

— **На ощупь похож на пенопласт.**

— Да, похож. Это полилактид, биоразлагаемый полимер, из которого сейчас делают винты для скрепления костей при переломах, шовную нить и т.д. То есть этот материал уже себя зарекомендовал. В основном пористые изделия делают именно из природных полимеров — это хитозан, коллаген. Но у них есть недостаток — они впитывают в себя воду и, соответственно, становятся тяжелыми. Полилактид же — гидрофобный материал, он боится воды, отталкивает ее. Кроме того, мы сделали пористую поверхность — а чем она более разрозненная, тем более гидрофобным получается материал.

Существует так называемый эффект лотоса, когда капелька лежит и практически не касается листа растения, хотя материал растения гидрофилен — любит воду. Все потому, что есть ворсинки, между которыми вода не проникает. Они так близко расположены друг к другу, что из-за поверхностного натяжения энергетически невыгодно, чтобы влага проникала внутрь. А есть так называемый эффект розы, когда капелька красиво лежит, но не скатывается. Это значит, что первый слой чуть-чуть смочился, а дальше влага уже не идет.

— **У вас сочетаются оба этих эффекта?**

— Да, материал у нас получается гидрофобный, не любящий воду, его поверхность достаточно изрезанная, чтобы вода вследствие поверхностного натяжения туда не входила. Но со временем при биодеградации материал все-таки набухает.

— **Сравнение с цветами весьма необычно и поэтично. У вас уже ведутся клинические исследования?**

— Еще нет, мы сейчас выходим на доклинические исследования. Следующий этап — цитотоксичность, гемолитическая активность, чтобы доказать, что материал не токсичен. Хотя мы, конечно, с большой степенью вероятности знаем, что с ним в этом смысле все в порядке, потому что он уже известен в медицине, но это всегда нужно доказывать. К сожалению, это не очень быстрых



Объемный пористый имплант на основе полилактида, выполненный по форме части плевральной полости

путь, но таковы правила. Надеюсь, уже в нынешнем году начнутся исследования на животных.

— **Я вашем виварии?**

— Возможно, в нашей виварии, зависит от того, какая модель будет нужна. Сейчас идет подбор биоадекватной модели. Ведь наши изделия нужно помещать в плевральную полость более-менее подходящего размера. Но самое главное — материал готов, он принципиально работает, и теперь надо доказать, что он безопасен. Тогда можно его внедрять, идти на регистрацию и т.д.

— **Как вы думаете, когда он будет внедрен в практическое здравоохранение?**

— При самом хорошем раскладе клинические испытания могут начаться уже через два года. А затем, еще года через два-три, можно говорить о внедрении.

— **Как называется ваш материал? Может быть, «Лотос» или «Роза»?**

— Пока ничего поэтического мы не придумали. Мы называем его «пористый материал на основе полилактида или полилактонов». А хирурги — «биорезорбируемый плевральный имплантат», который позволяет сформировать биопломбу.

— **Пломба? Как в стоматологии?**

— Совершенно верно. По сути, это легкая пломба на легкое, извините за тавтологию.

— **Насколько востребованным вам представляется этот материал в медицине?**

— Это очень востребованный материал. Мы смотрели статистику по различным лекарственно устойчивым формам туберкулеза, после которых остаются такие каверны. Это огромные цифры. Изначально у нас была задача именно по туберкулезу, но уже понятно, что можно расширить круг применений таких изделий, в частности при онкопластических операциях. Здесь нам нужно пригласить других врачей — в первую очередь онкологов. Уверен, когда будет зарегистрировано наше изделие,

любые врачи смогут пользоваться им по своему усмотрению. По аналогии можно изменить свойства материала, сделать его более прочным, менее эластичным, внедрить разные лекарства.

— **Прямо через этот материал?**

— Да, непосредственно в этот материал, прямо в его массу можно внедрить лекарство — например антибиотик, и он при биоразложении будет попадать в нужный орган. Это уже следующий виток нашей работы.

— **То есть это очень серьезная и перспективная фундаментальная и прикладная работа.**

— Да, эти материалы рождаются из фундаментальных исследований, мы просто наблюдали, как кристаллизуется растворитель при замерзании, как потом испаряется этот лед, что влияет на его свойства, как мы можем их поменять. Сейчас мы можем с этим материалом сделать самые разные варианты. Например, чтобы он был совсем мягким, как легочная ткань, или, наоборот, как кость или хрящ. Мы можем это варьировать по срокам биоразложения, по жесткости, внедрять различные вещества. Каждая итерация будет влиять на свойства. Обладая комплексом знаний, мы можем сделать то, что необходимо. Нужны фундаментальные исследования, понимание процессов образования структуры, чтобы однажды нас

попросили сделать материал с определенным набором свойств — и мы сделали ровно то, что нужно, потому что мы это знаем и умеем.

— **Это применимо только к легочной ткани?**

— Нет, в принципе, это применимо везде, где нужны объемные заместители. Сейчас, например, мы уже работаем с Центральным НИИ стоматологии и челюстно-лицевой хирургии, делаем костно-пластические материалы.

— **Мне кажется, в урологии, гинекологии это тоже может быть востребовано.**

— Вполне возможно. Все зависит от задачи. Где-то нужна сеточка, где-то пластинка. На том же легком это может быть заплатка, которая останавливает кровь, — гемостатический материал. Где-то необходим объемный заместитель. Можно делать все что угодно — технологии и понимание процессов формирования это позволяют.

— **Сегодня физики все чаще соприкасаются с биологией, медициной. Как вы можете это прокомментировать?**

— Действительно, я учился на физфаке, но второго курса начал работать с химией полимеров, с полисахаридами. И это, конечно, очень близко подвело меня к медицине. Стыковые работы, безусловно, всегда интереснее, потому что можно изучать что-то новое и получить что-то нужное.



Пористые материалы на основе биополимеров



Мы называем его «пористый материал на основе полилактида или полилактонов». А хирурги — «биорезорбируемый плевральный имплантат», который позволяет сформировать биопломбу

Разработка разнообразных имплантов в химической лаборатории

— **Какую роль играет то, что вы работаете в Курчатовском институте?**

— Решающую. Сама идея, с которой М.В. Ковальчук создавал наш комплекс НБИКС-технологий, нацелена на решение именно таких междисциплинарных вопросов с помощью конвергенции, слияния, работы разных технологий на единый результат. Здесь все для этого создано. У нас на одной площадке работают и синхротрон, и ультрасовременная лаборатория электронной микроскопии, ведутся исследования по клеточной биологии, нейробиологии и даже исследования сознания.

— **Синхротрон вам тоже сейчас нужен в этих работах?**

— Конечно! Синхротрон необходим, чтобы понять, как будет разлагаться губчатый материал, потому что мы должны измерить степень кристалличности полимера, понять, как он разложится, как молекулы уложились между собой. Электронная микроскопия необходима, чтобы определить, какая нам нужна структура. Получить такой объемный, ровный, абсолютно однородный имплант оказалось сложной задачей.

— **Выходит, эта штука у вас в руках — высокотехнологичное изделие?**

— Да, это микрофазно расслоенный полимер, то есть он как будто выпал в осадок, но не совсем. Мы его «поймали» в нужный момент и испарили воду, точнее лед. От структуры зависит очень многое. Этот материал отличается тем, что все поры у него смотрят в одну сторону. Он отлично проводит влагу, то есть возникает капиллярный эффект. Допустим, если подобный материал вставить в канал разорванного спинного мозга, он может помочь соединить аксоны, воссоздать ткань, проводящую нервный импульс.

— **Значит, при нейрохирургических операциях он тоже может быть незаменим?**

— Это очень сложная вещь, мы над ней пока только думаем, мечтаем, но это действительно может стать реальностью. А началось все с наблюдений над тем, как полимер выпадает из раствора.

Разные полимеры выпадают по-разному, мы следили за этим процессом, и это настоящие химия и физика полимеров, их фундаментальные исследования. Из них обязательно рождаются яркие прикладные задачи.

— **О чем еще мечтаете, что хотите создать?**

— Задумок много. Хирурги уже поставили перед нами новую задачу: можно ли сжать этот материал, чтобы мы его могли ввести через торакоскоп (его диаметр — 1–1,5 см), а потом внутри организма он снова распустился, расправился, как лепестки у цветка? Или чтобы пациент, придя на обследование, сделал томографию — и сразу же, через день или два, для него изготовили такой имплант, провели операцию? Это снова научные вызовы, но мы к ним готовы.

Конечно, хотелось бы поработать с костями. У нас уже есть некоторые заделы, чтобы восстановить структуру кости, потому что наша пористая структура вообще похожа на костную ткань. Нам осталось доработать состав, чтобы там было больше гидроксиапатита, чтобы присутствовали «строительные блоки» кости, и затем уже перейти к восстановлению кости, ее регенерации. Когда мы перейдем не к крепящим изделиям, а к устранению критического дефекта кости и ее полному восстановлению, это будет новое слово к ортопедии. Таковы ближайшие планы. Ну а мечта — построить такую систему, с помощью которой можно было бы лечить людей системно, а не частями.

— **Систему, которая восстанавливала бы человека там, где это необходимо?**

— Это называется «биоискусственная клеточная система»: чтобы человек, поступая на работу, сдавал в банк клетки и при каких-то заболеваниях или травмах имел возможность получить правильный каркас и восстановить поврежденные части организма с помощью собственных клеточных технологий. Думаю, когда-нибудь так и будет. ■

Беседовала Наталья Лескова



НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Диагностика для реактора

Мы все привыкли проходить те или иные медицинские исследования — флюорографию, рентген, УЗИ, КТ, МРТ... Эти методики так или иначе помогают заглянуть внутрь организма, распознать патологию и принять правильное решение о лечении. Оказывается, подобные методики сегодня применимы далеко не только к живым организмам, но и к промышленным и техническим объектам в целях сохранения целостности конструкции и их безопасности для человека и окружающей среды. О том, как этого удастся достичь, — наш разговор с **Дмитрием Андреевичем Седневым**, директором Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Томского политехнического института.



— **Каковы главные цели вашей работы?**

— Основная цель нашей школы — разработка систем и методов контроля различных технических систем. Мы создаем приборы, которые позволяют заглянуть внутрь объекта, увидеть его внутреннюю структуру, понять, какие дефекты там есть, а затем предложить способы их исправления либо принять решение, стоит ли использовать этот объект в дальнейшем.

Исторически сложилось, что в ТПУ был создан научно-исследовательский институт интроскопии, что буквально понимается как «заглянуть внутрь». Этот институт специализировался на ускорительной технике — так называемых бетатронах. С научной точки зрения это циклический ускоритель заряженных частиц, а с практической — мощная рентгеновская трубка, которая позволяет разогнать частицы до значительной энергии и потом выпустить поток гамма-квантов. Как на рентгеновском аппарате человеку смотрят легкие, так же мы исследуем изнутри контейнер или любое техническое устройство.

С течением времени эти устройства совершенствовались, находили новое применение, в том числе медицинское. А в последние четыре года у нас основной упор делается на томографии.

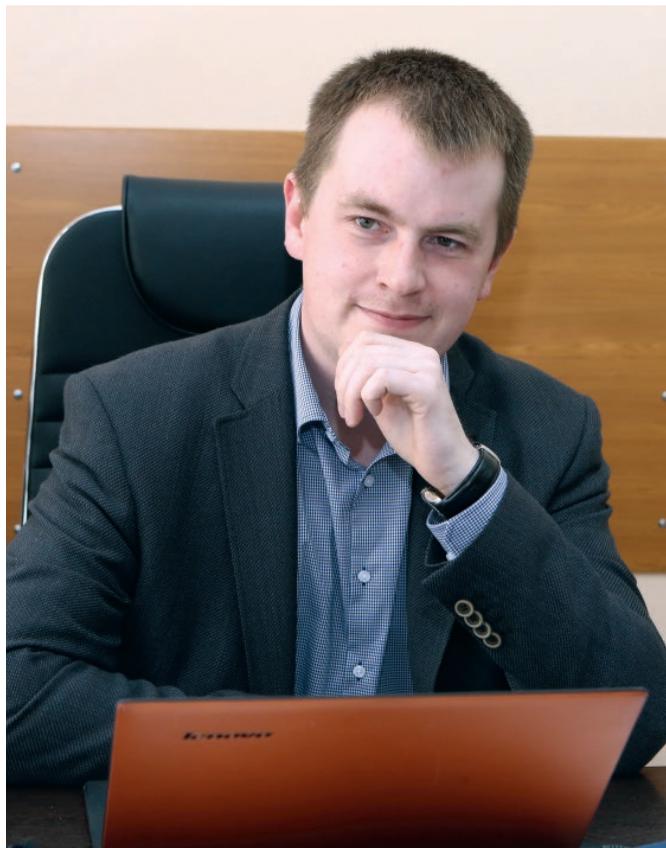
— **В чем ее основное отличие от предыдущих разработок?**

— Это не просто получение плоскостных изображений. Мы получаем трехмерное изображение структуры объекта. Такое возможно за счет того, что мы делаем многоракурсную съемку — то есть под разными углами проводим контроль различными физическими методами, а потом восстанавливаем модель объекта с помощью математических алгоритмов. Принципы томографии были известны и ранее, но их практическое широкомасштабное внедрение затруднялось из-за недостаточной продвинутой ИТ-сферы. Сейчас это стало возможным. Сегодня вычислительные мощности позволяют при компактных размерах производить сложные вычисления и визуализировать их результаты. Теперь мы можем получать информацию на новом уровне, иного качества, в том числе и для оператора систем неразрушающего контроля. Оператор может посмотреть результаты контроля в режиме реального времени и оперативно оценить целостность исследуемого объекта.

— **Для чего нужен этот неразрушающий контроль? Ведь раньше его не было, но мосты и прочие конструкции стоят.**

— Это некорректное утверждение. Он есть уже очень давно и развивается столько же, сколько человек создает конструкции. Просто он совершенствуется.

— **А каким он был? Прощупывание? Простукивание?**



Кандидат технических наук Д.А. Седнев

— Да, так и есть. Когда человек постучал по изделию, он знает, что целое, неповрежденное изделие звучит определенным образом. Если есть отклонения от правильного звука, можно методом простукивания найти дефекты. Более того, некоторые заводы до сих пор используют этот способ. Стучат, а потом дают заключение. И в конструкторской документации у них написано: метод простукивания.

— **Вы не шутите?**

— Нисколько. Потом они, правда, сталкиваются с проблемами, когда пытаются сдать изделие зарубежным заказчикам.

— **Иначе говоря, этот метод ненадежен?**

— Ненадежен, потому что крайне субъективен. Слушает человек, не имея никаких объективных факторов. Сегодня необходимы методы объективного контроля. Сейчас для оптического контроля применяются различные приборы — эндоскопы, камеры и т.д., в том числе лазерные профилометры. Это тоже один из способов визуально-измерительного контроля. Но он, повторюсь, был всегда. Человек оценивал, насколько структура внешне выглядит целостной, есть ли повреждения или недоделки. Потом это устранялось. Ну а когда появилась возможность заглянуть внутрь с помощью рентгеновских лучей, этим стали активно

пользоваться — исследовать как человека, так и промышленные объекты. С усложнением конструкций усложняются и методы их контроля. Один из последних трендов в этой области — использование технологий аддитивного производства для создания новых изделий. Внутренние структуры подобных объектов очень сложны, и даже если их простучишь, ничего не поймешь.

— **Какие конкретно методы у вас сейчас развиваются?**

— Мы продолжаем применять и развивать наши бетатроны, в том числе для рентгенографии: с ними выезжают в поле для контроля трубопроводов, резервуаров и для строительства опасных промышленных объектов. Но самое важное — теперь на основе бетатронов мы можем создавать томографические системы.

Сейчас наша инженерная школа выполняет проект по федеральной целевой программе совместно с Томским электромеханическим заводом. Мы создаем томографические системы для контроля запорных клапанов и арматуры газопроводов. Это толстостенные большие объекты весом до 10 т, где в том числе участвует бетатрон.

Помимо этого, активно развиваются методы ультразвуковой томографии. В 2010 г., согласно Постановлению Правительства РФ № 220, у нас была создана Международная научно-образовательная лаборатория неразрушающего контроля под руководством профессора Михаэля Кренинга, которая интенсивно развивается.

Как отдельное серьезное направление можно отметить системы тепловизионного, или термографического контроля. У нас работает профессор В.П. Вавилов, имеющий мировое признание в этой области. В тепловых методах используется температурный контраст изделия и меряется динамический процесс его нагрева либо остывания, после чего появляется информация о внутренних дефектах. Группа В.П. Вавилова специализируется на методах обработки и разработке программного обеспечения. В прошлом году он выполнил проект по созданию роботизированной системы тепловизионной томографии, и эта система сейчас признана самой быстрой в мире, обеспечивая скорость контроля до 20 м/мин.

Еще одно развиваемое направление — оптический контроль, то есть роботизированные методы оптической топографии, или профилометрии. Для томографии часто нужно получить трехмерную

модель объекта, но, к сожалению, заказчики не всегда готовы предоставить таковую. Мы решили, что сами должны выходить из этой ситуации. Нами были созданы системы, которые позволяют в реальном масштабе времени отсканировать деталь (это происходит достаточно быстро за счет роботизированного манипулятора) и с высокой точностью измерить даже шероховатость поверхности. Так мы создаем высокоточную трехмерную модель. Это придает новый качественный уровень точности результатов, которые мы получаем. Резюмируя, можно сказать, что наша инженерная школа активно движется в направлении роботизации и автоматизации методов неразрушающего контроля.

— **Вы еще ведете обучение специалистов в этой области?**

— Да, мы учим студентов приборостроению, электронике, наноэлектронике и другим специальностям. В этом году у нас произведен первый набор

Сегодня вычислительные мощности позволяют производить сложные вычисления и визуализировать их результаты. Оператор может их посмотреть в режиме реального времени и оперативно оценить целостность исследуемого объекта

на уникальную магистерскую программу «Томография промышленных систем». Студенты работают на самом современном оборудовании мирового класса и после окончания программы готовы перенести свой опыт на промышленные предприятия. Мы не только обучаем студентов, но также обеспечиваем подготовку, переподготовку и аттестацию сотрудников предприятий, которые занимаются дефектоскопией, и выдаем им разрешения на работу в этой профессиональной области.

— **А что за новое направление по сварочным процессам?**

— В 2019 г. в Инженерной школе неразрушающего контроля и безопасности открывается направление «Автоматизация сварочных процессов и производств». В нашем подразделении исторически существовало направление обучения сварочным технологиям. Разработчики систем неразрушающего контроля работают в тесном контакте со специалистами по сварке, так как основной объект неразрушающего контроля — сварные соединения, где необходимо иметь полное понимание технологических процессов

соединения деталей. Общая стратегия нашей школы — автоматизация и роботизация процессов контроля качества — также коснулась и подготовки специалистов по сварке. С 2019 г. школа будет готовить профессионалов автоматизации сварочных процессов и технологии. Но это не просто «смена вывески» — есть значительный научный задел в этой области. Недавно сотрудники закончили создание и внедрение в производство робота — сварщика топливных элементов для атомных электростанций. На мировом уровне эта работа уникальна и демонстрирует высокий профессионализм коллектива.

— **Много ли у вас заказов для контроля таких изделий?**

— Да, немало. Буквально перед вашим приходом пришел запрос на контроль металлических балок, которые напечатаны аддитивным методом. Мы это успешно осуществляем. Сегодня это очень большая отрасль, потому что конструкторы не имеют достаточно информации для понимания того, как у них эта балка спекается внутри, а это крайне важно для отработки технологического процесса. Такая задача тоже решается — помочь конструктору отработать технологический процесс.

— **То есть для вас важно не просто найти дефект, но и помочь достичь технологического совершенства?**

— Да. Мы такую задачу решали, например, с Новосибирском для отработки заготовок для зубных керамических протезов. Они делали их в рамках импортозамещения, и мы проверяли партии керамических пластин, чтобы было ясно, какой способ прессования наиболее подходит, какие выбрать оптимальные температуры. Они прессовали партии по 20–30 штук с различными технологическими параметрами, потом мы это контролировали. Затем все это отправлялось в зуботехническую лабораторию, вырезалось, спекалось, проверялась усадка, и заказчик сравнивал, насколько мы точны в контроле. В итоге мы добились приемлемого качества.

— **Насколько часто удается обнаружить внутренний дефект, хотя внешне все выглядит целостно?**

— Очень часто, и это нормально.

— **Дефекты — это нормально?**

— Да. Во-первых, они могут образовываться с течением времени. Во-вторых, я хочу подчеркнуть, что не каждая найденная несплошность — это дефект. Дефект ли это, решает технолог, который



1, 2. Роботизированная система ультразвуковой томографии

должен сказать: вот эта несплошность критична, а эта нет. Поэтому наша задача — найти несплошности, а потом, основываясь на нормативных документах и конструкторской документации, принимают решение. Поскольку у нас сейчас вся промышленность стремится перейти на современные комплексы производства, то есть использовать численно-программное управление в станках, роботизированные и максимально автономные линии, мы тоже встраиваемся и стараемся предложить соответствующие решения. Это существенно повышает достоверность контроля, увеличивает его скорость и повторяемость, что тоже немало важно. Если раньше, например, мы снимали на пленки, то сейчас переходим к тому, чтобы снимать на цифровые панели, и это тоже большой шаг вперед, потому что означает снижение стоимости и повышение качества.

Но необходимо и внедрение возможностей использования таких приемников на законодательном уровне. Например, сейчас есть нормативные документы для контроля сварных соединений трубопроводов с помощью цифровых панелей. Не все отрасли еще их внедрились, но я думаю, что мы активно идем по этому пути и придем в ближайшие три-пять лет к тому, что все объекты станут контролировать с помощью цифровых детекторов. Эту информацию проще хранить, быстрее получать, и это не приводит к возникновению химических отходов, образующихся в процессе проявки, печати и т.д.

Западные компании также активно движутся в этом направлении. Например, компания BMW

внедрила томограф для автомобилей. Установлены роботизированные манипуляторы: один переносит источник излучения, второй — это цифровой детектор. Они могут позиционироваться вокруг всех деталей автомобиля по заданной модели. Думаю, мы тоже к этому придем. Как производители и разработчики, мы готовы к этому уже сейчас.

— Насколько уникальны для нашей страны технологии, которыми вы владеете?

— Это и дар, и проклятие. С одной стороны, мы можем делать действительно уникальные вещи. И мы здесь, наверное, если не ключевой игрок, то один из ключевых и точно единственный, кто может производить комбинации методов, потому что обычно предприятие или институт специализируется на одном-двух методах.

— А почему проклятие?

— Потому что мы должны постоянно находить себе заказы.

— Последнее, что у нас появилось, — создание системы ультразвуковой томографии для термоядерного реактора. Это реактор *ITER*, и от России в нем активно участвует Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры (НИИЭФА) им. Д.В. Ефремова. Он производит компоненты стенок дивертора, которые обеспечивают внутри удержание плазмы. Архисложная задача с точки зрения материаловедения и производства. Это суперсложные сплавы, которые никто никогда не контролировал. Но это нужно делать. И поэтому, как только мы окунулись в эту область в 2014 г., мы нашли их как своих заказчиков и партнеров. В сотрудничестве с немецкими коллегами мы создали для них роботизированный ультразвуковой томограф. Сейчас выходим на новый уровень. В НИИЭФА расширяется производство, им нужно больше деталей, которые будут еще более сложной формы, значит, нужно ускорить контроль, улучшить качество контроля. Нужно также получать *CAD*-модели объектов.

Поэтому к 2020 г. в НИИЭФА будет стоять новая система, которая начнет осуществлять роботизированный томографический ультразвуковой контроль.

Еще один крупный заказ — с Томским электромеханическим заводом для контроля запорной арматуры для «Силы Сибири». Это проект «Газпрома» по строительству газификационной нитки, но, по сути, задача универсальная. Это обеспечение контроля толстостенных литых конструкций.

Здесь вот в чем особенность. Мы готовы не только обеспечивать контроль, но и увязать данные контроля с данными, которые предоставляют проектировщик и технолог. То есть мы связываем все в одну интеллектуальную систему производства. Мы перешли к автоматизированным решениям по рентгеновской

томографии на основе бетатрона, потому что там очень толстые стенки и обычные аппараты бессильны. Интересно также решение в области ультразвукового контроля. Так как объекты большие, с массой до 10 т, стандартное решение, которое используется для объектов сложной формы, — ультразвуковая иммерсионная ванна — здесь не подходит, потому что это огромный расход воды и времени на контроль.

Мы здесь искали решение по снижению количества воды, которое используется для контроля, либо по полной ее замене. И нашли способы, позволяющие с помощью оригинального устройства, которое мы сделали, обеспечить качественный акустический контакт. На эту огромную поверхность нам хватает буквально литра воды.

— То есть заказчики за вами не гоняются?

— Крупные заказы — это всегда процесс долгого обсуждения и согласования, встраивание в планы инвестиционного развития, бюджетирование. Мы выбрали для себя путь усложненного технологического развития, передовых решений. При этом мы вместе с нашим заказчиком должны быть в постоянном поиске источников финансирования, нахождения оптимального баланса стоимости и качества. Можно накрутить стоимость до небес, но при этом качество тоже будет запредельное. Но это ведь далеко не всегда нужно. Избыточное качество — тоже плохо.

— Расскажите о конкретных проектах — самых интересных и сложных.



— Почему? Разве у вас дефицит воды?

— Дело в том, что мы контролируем не только металлы. Композиционные материалы активно входят в нашу жизнь. А помимо того что они сложны по структуре, они еще и обычно активно напитываются водой. Нельзя, скажем, деталь от вертолета или самолета надолго опустить в воду. Но вы можете ее смочить, более того, вы можете даже использовать не воду, а какую-то легкоиспаряемую жидкость. Уверен, что это решение в дальнейшем будет востребовано. Более того, у нас уже есть контакты с холдингом «Вертолеты России» в отношении проведения контроля узлов вертолета. Они хотят у себя подбирать те перспективные методы неразрушающего контроля, которые позволят обеспечить качество продукции для внутреннего и внешнего рынков, сделать ее более конкурентоспособной, упрочить наши позиции. Надеюсь, это сотрудничество мы будем успешно развивать.

Это не единственное наше решение в авиационной области. В прошлом году мы внедрили на предприятии Объединенной двигателестроительной корпорации первую в России роботизированную систему цифровой радиографии, которая успешно прошла апробацию. Все эти примеры внедрения в отрасли очень показательны. Они говорят о том, что мы движемся в правильном направлении, и производители все чаще вступают с нами в коллаборацию. У нас складываются отношения не типа «клиент — производитель», а скорее партнерские. Только в совместной работе мы можем прийти к искомому результату: обеспечению качественной продукцией и хорошему экспортному потенциалу.

— Вы упомянули о медицинском применении бетатрона. Можно ли рассказать об этом подробнее?

— Не буду останавливаться на тех областях, где мы делаем кардиографы, наноэлектроды и т.д., хотя это тоже перспективно. Скажу о применении неразрушающего контроля. Первой и крупной разработкой в этой области были бетатроны для интраоперационной терапии. У нас сейчас ведутся переговоры с крупными компаниями (*Rusatom Healthcare*, «Алмаз — Антей») по созданию производственных линий для подобных комплексов и оснащению ими отечественных клиник. Итальянцы активно работают на линейных ускорителях в тех же самых целях и получают очень хороший эффект, поскольку, оказывается, во время операции облучение позволяет заменить пятидневный курс радиационной терапии и в восемь-десять раз снижает вероятность локального рецидива. Это очень хорошая технология, при этом у нас она проще в обслуживании и дешевле: это полное импортозамещение.

— Уже есть опыт клинического применения?

— У нас были опытные работы. В клинике НИИ онкологии под руководством академика Е.Л. Чойнзона мы показали эффективность этих методов. Е.Л. Чойнзон популяризирует идею интраоперационной терапии в российской онкологии. Сейчас мы подошли к тому состоянию, когда готовы коллаборационно изготавливать такую технику для нужд отечественного здравоохранения.

А по поводу перспективных направлений сложилось понимание, что нам нужны скрининговые системы для раннего обнаружения раковых опухолей. Сейчас есть научные проекты в рамках программы повышения конкурентоспособности ведущих исследовательских университетов, или программы 5–100, и один из таких проектов направлен на создание системы, которая в перспективе может стать основой для малодозовой маммографии. Мы уже обсуждали это с нашими онкологами, интерес у них, безусловно, имеется.

— В чем суть этой системы?

Облучение во время операции позволяет заменить пятидневный курс радиационной терапии и в восемь-десять раз снижает вероятность локального рецидива

— Обычно при рентгеновском исследовании используется контраст поглощения. Мы же будем использовать не только его, но и фазовый, и темнопольный контрасты, который мы внедряем в сотрудничестве с коллегами из Технологического института Карлсруэ (Германия). Наши сотрудники и аспиранты проходили там стажировку и привезли идею по использованию двумерных дифракционных решеток для комплексного контраста. В результате мы получаем сложные интерференционные картины, которые способны анализировать и «вытаскивать» информацию о крайне малых объектах. Более того, мы рассчитываем, что предлагаемый подход позволит распознавать характер образования: злокачественная или доброкачественная опухоль. На мой взгляд, это перспективная и заслуживающая развития область, ведь в этом секрет будущего долголетия — нашего и наших детей. ■

Беседовала Наталия Лескова



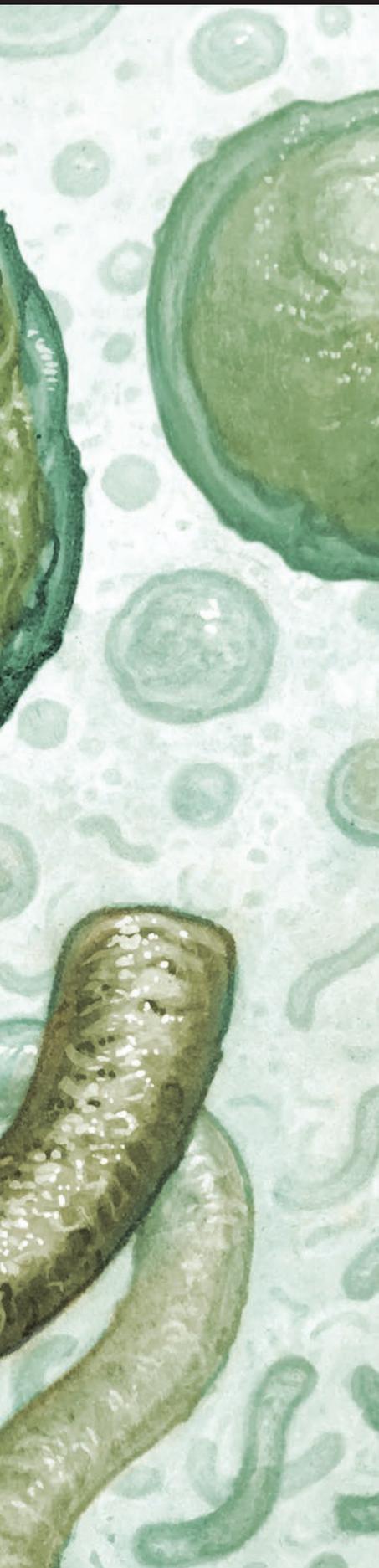
ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛ

Научная Россия

<http://scientificrussia.ru>







Партнерские
связи в мире
микробов
распространены
в природе

МИКРОБИОЛОГИЯ

КОММУНАЛЬНЫЕ МИКРОБЫ

Рогир Браакман
и Джеффри Марлоу

гораздо
шире и более
значимы, чем мы
представляли

ОБ АВТОРАХ

Рогир Браакман (Rogier Braakman) — исследователь, работающий в Массачусетском технологическом институте. Занимается изучением эволюции метаболизма и обратных связей между живыми организмами и окружающей средой.

Джеффри Марлоу (Jeffrey Marlow) — постдокторант Гарвардского университета. Занимается исследованием метаболизма микроорганизмов в сложных системах.



од 800-метровой толщей воды у берегов Орегона носовые фары подводного аппарата *Alvin* выхватывают из мрака разноцветный оазис — покрывающий дно плюшевый ковер из белых, желтых, оранжевых микроорганизмов с вкраплениями из колоний моллюсков. Красный морской окунь с опаской рассматривает аппарат своими выпуклыми молочно-белыми глазами; из меловой скальной породы вырываются струйки пузырьков газа. Луч света носового фонаря, как поводок, тянет за собой аппарат, открывая все новые и новые фрагменты разноцветного ковра, кажущегося бесконечным.

Шел 2010 г. Один из нас (Джеффри Марлоу) вместе с двумя коллегами протиснулись внутрь титановой сферы аппарата *Alvin* за несколько часов до начала экспедиции. Прильнув к иллюминаторам, мы погружаемся все глубже и глубже. Наша цель — гористый участок Гидрат-Ридж, на котором из земной коры выделяется огромное количество метана. С каждым годом ученые открывают все больше таких метановых источников (в ходе одной только экспедиции 2016 г. в восточной части Тихого океана их обнаружено 450), и все актуальней становится вопрос, касающийся их влияния на окружающую среду. Ведь метан относится к числу газов, вызывающих тепличный эффект: несмотря

на то что на его долю в атмосфере приходится всего 0,00018%, он отвечает за 20% суммарного повышения ее температуры. По оценкам, каждый год примерно 10% метана попадает в атмосферу из источников, расположенных на морском дне. Потoki метановых пузырьков могли бы привести к экологической катастрофе, но что-то препятствует попаданию метана в атмосферу, и это «что-то» — специфические бактерии.

Они обитают на морском дне под слоями бактерий белого цвета и осколками раковин моллюсков, жадно поглощая метан. Их обширные колонии, где бактериальные частицы находятся в тесной связи друг с другом, видоизменяют ландшафт,

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Давно известно, что микроорганизмы сыграли ключевую роль в формировании биосферы Земли. Считалось, что микробные сообщества ведут жесточайшую борьбу друг с другом за ресурсы.
- Но недавно полученные данные о микроорганизмах, обитающих в грунтовых водах и океанах, показали, что многие из них на самом деле сотрудничают друг с другом.
- Это наводит на мысль, что партнерские отношения между микроорганизмами — а не их изолированность — послужили основой формирования того способа жизни, какой мы видим, и удивительной способности биосферы породить новые виды живых систем.

глубоко под дном океана до песчинок в пустыне, поднимающихся высоко в воздух. И биологи давно поняли, что микроорганизмы играют далеко не последнюю роль в распространении этих элементов и химических соединений, делая нашу планету пригодной для жизни.

Но подход, используемый при изучении мира микробов, был такого свойства, что не давал возможности выяснить природу этих процессов. Десятилетиями микробиологи фокусировались на изучении отдельных микробных частиц и их компонентов. Из кишащей микробами среды между частицами песка они выделяли единичные микроорганизмы и исследовали их биохимию и генетику. Это позволило получить информацию о микроорганизме в целом, а также о том, как функционируют составляющие его биомолекулы. Но когда биологи попытались выйти за пределы этих знаний, чтобы представить микробную экосистему как нечто целое, составленное из связанных друг с другом элементов, оказалось, что для этого их знаний недостаточно. Из всего множества диких форм микроорганизмов удавалось изолировать лишь малую часть, откуда следовало, что штаммы, образующие сложные природные сообщества, взаимосвязаны таким замысловатым способом, что воспроизвести это в лабораторных условиях не представляется возможным. А само существование множества процветающих видов, часто комплементарных друг другу, противоречило представлению о микробных экосистемах как о совокупности элементов, конкурирующих за ресурсы.

Более того, интенсивность метаболизма отдельных компонентов этих экосистем, определяемая в лабораторных условиях, — например, скорость образования кислорода или потребления азота — редко совпадала с таковой в естественных условиях, потому что, как правило, микробы, которых удавалось изолировать, были более жизнестойкими, чем те, которые не выдерживали манипуляций в процессе выделения. Другими словами, как это обычно бывает, целое отличалось от его составляющих.

Между тем появляется все больше свидетельств того, что взаимосвязь микроорганизмов по каким-то причинам жизненно важна для них. Успехи, достигнутые за последние десять лет в секвенировании генома микроорганизмов и в их визуализации, а также в других биотехнологических областях, позволили исследовать микробные сообщества более глубоко, чем когда-либо прежде. Новейшие данные свидетельствуют о том, что кооперация — это некий движитель в формировании биосферы: когда микроорганизмы

эволюционируют в сторону обмена энергией, генетической информацией и метаболитами, открываются новые пути к трансформации живых систем и их распространению.

Игра в прятки

Вернемся к аппарату *Alvin*. Его рука-робот проталкивает прозрачную пластиковую пробирку открытым концом вниз в тонкий слой микробной массы. Вначале процесс идет почти беспрепятственно, затем проталкивать пробку становится все труднее, она продвигается толчками, при очередном усилии упирается в неподатливый слой грунта — и мы получаем цилиндрическую колонку из всех пройденных пробиркой слоев.

В тот же день Марлоу с коллегами исследовали продольный срез колонки в лаборатории аппарата, оснащенной всем необходимым. Под верхним слоем белого цвета находилось глинистое бежевое вещество, переходящее в нечто клейкое и чер-

Если один из членов микробного сообщества подвергается сильному неблагоприятному воздействию, остальные члены могут испытать на себе его последствия, и тогда не исключен коллапс всей системы

ное, дальше шли слои горной породы, сквозь которые пробирка проходила с большим трудом. Интересующие нас микроорганизмы обитали в самом темном слое, распространявшем запах протухшего яйца. Более ранние исследования показывали, что именно здесь из осадочных пород высвобождается метан, образующийся на больших глубинах, и сульфат из вышележащих водных слоев. Но попытки идентифицировать микроорганизмы, которые могли бы одновременно поглощать метан и сульфат, одна за другой заканчивались ничем. Применив другой подход, наши коллеги использовали метан и сульфат в качестве приманки, чтобы вынудить «воришек» покинуть свои убежища, и отслеживали в лабораторных условиях исчезновение газов-приманок. В ходе одного из таких поисков в начале 2000-х гг. мы обнаружили, что неуловимый объект не один, а два: это был ансамбль из микроорганизмов двух видов с признаками метаболической активности. Один из партнеров пары поглощал метан, другой метаболизировал сульфат.

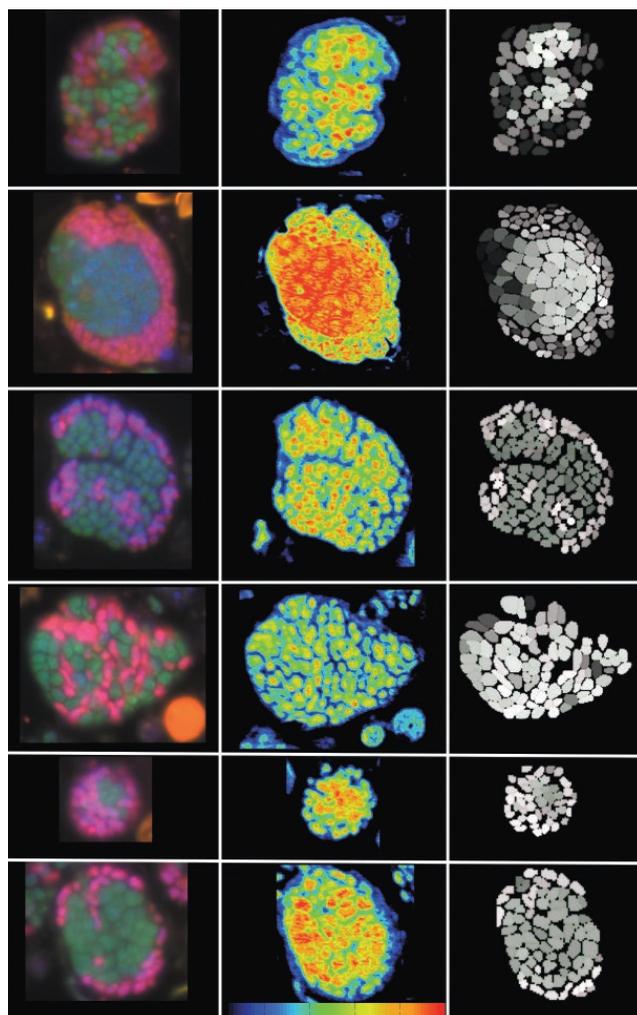
Данный процесс — анаэробное окисление метана — был бы невозможен без тесного сотрудничества между анаэробными метанотрофами

и восстанавливающими сульфат (сульфатредуцирующими) бактериями. Метан — высокоэнергетичная и стабильная молекула, расщепить ее с высвобождением элементов, которые участвовали бы в метаболизме, очень трудно. Анаэробные метанотрофы способны делать это, но сверхпродукция высвобождаемых электронов приводит к остановке метаболизма и выбросу в среду излишков электронов. Однако то, от чего избавляется один микроорганизм, использует другой. Сульфатредуцирующие бактерии тут же включают эти избыточные электроны в свою метаболическую сеть для превращения сульфатов в сульфиды (которые придают осадку гнилостный запах). Это классический пример симбиоза: анаэробные метанотрофы получают быстродействующий «сервис по сбору отходов», а сульфатредуцирующие бактерии — «домашнюю» энергетическую фабрику.

Наша экспедиция к Гидрат-Ридж показала, что симбиотическое поглощение метана происходит не только в осадочных породах, где феномен был впервые обнаружен, но и в карбонатных породах, которые образуют многочисленные холмики вокруг мест выхода метана. Взаимодействие между анаэробными метанотрофами и сульфатредуцирующими бактериями осуществляется на микроуровне, но исследования в Черном море, Мексиканском заливе и других местах показали, что это широкомасштабный процесс, ответственный за поглощение примерно 80% метана, высвобождаемого из морского дна, и образование карбонатных холмиков.

У истоков сотрудничества

Обширные подземные пространства изобилуют примерами такого взаимодействия микроорганизмов, а результаты секвенирования ДНК микробов, обитающих в грунтовых водах и осадочных породах морского дна, позволили установить, как именно происходит такое взаимодействие. И с увеличением числа микроорганизмов, чей геном был секвенирован, все яснее становились две причины, по которым такая кооперация могла стать неизбежной. Во-первых, бактерии и археи эволюционно удалены друг от друга в гораздо большей степени, чем можно было представить: число ветвей древа жизни невообразимо велико. Но что еще поразительнее — геномы этих микробов на удивление малы: у многих из них недостает информации для построения функциональной клетки или для завершения метаболической трансформации, необходимой для извлечения энергии из питательных веществ. «Исследуя новую среду обитания, — говорит Лора Хаг (Laura Hug), профессор микробиологии окружающей среды из Университета Уотерлу, член группы исследователей, открывших целый ряд неизвестных ранее микроорганизмов, — мы неизменно обнаруживали в ней микробное



Визуализация агрегатов анаэробных метанотрофов и сульфатредуцирующих бактерий, которые обитают в местах выхода метана (использованы разные методы визуализации)

сообщество, обладающее некой специфической особенностью, например метаболизмом азота. Однако идентифицировать микроорганизм, который содержал бы в своем геноме необходимую информацию в полном объеме, не было возможности».

Вновь открытые микроорганизмы часто синтезировали не все аминокислоты, необходимые для образования белков, или не все нуклеотиды, составляющие ДНК. Это означало, что они заимствовали недостающие элементы у соседних клеток, синтезирующих данные компоненты, с избытком. Подобные сообщества, по-видимому, извлекали энергию тоже в ходе коллективного процесса: индивидуальные клетки осуществляли некие химические реакции и передавали образуемый продукт по цепочке другим клеткам, выполнявшим дальнейшие превращения. Такое распределение строительных блоков и энергетических ресурсов невозможно без кооперации разных микроорганизмов.

Зарождение кооперации

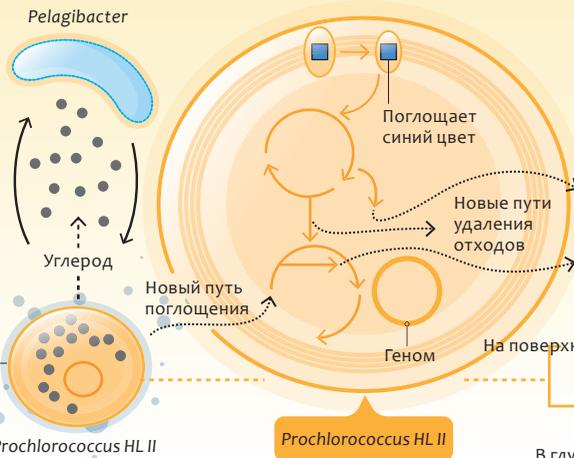
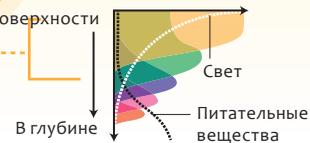
Сотни миллионов лет назад два из наиболее распространенных в то время вида микроорганизмов, обитающих в океане, — *Prochlorococcus* и *Pelagibacter* — вступили во взаимовыгодные отношения, основанные на использовании отходов жизнедеятельности друг друга. Полагают, что это сотрудничество могло привести к насыщению кислородом (оксигенации) океанов — революционному событию для возникновения жизни на Земле. Недавние исследования эволюции метаболизма этих двух видов показали, что послужило движущей силой партнерства и в чем именно оно заключалось.

Для того чтобы реконструировать эволюцию *Prochlorococcus*, биологи картировали изменения в метаболизме одной из подгрупп семейства — сети биохимических реакций, в ходе которых из питательных веществ образуются строительные блоки клеток. Поглощая все больше солнечного света, члены этой подгруппы высвобождали избыточное количество углерода — отхода жизнедеятельности. *Pelagibacter*, встроившись в метаболическую сеть *Prochlorococcus*, по-видимому, использовала эти отходы в качестве источника энергии.

Когда-то давно древние микроорганизмы оккупировали большую часть освещаемой солнцем поверхности океанов (верхний график в колонке). Со временем естественный отбор начал благоприятствовать *Prochlorococcus*, поглощавшему больше солнечной энергии и питательных веществ. В результате интенсивного потребления последних их концентрация вблизи поверхности воды снижалась, и клетки, которым не хватало питательных веществ, перемещались в более глубокие слои. Это привело к разделению *Prochlorococcus* на подгруппы, наблюдаемые сейчас.

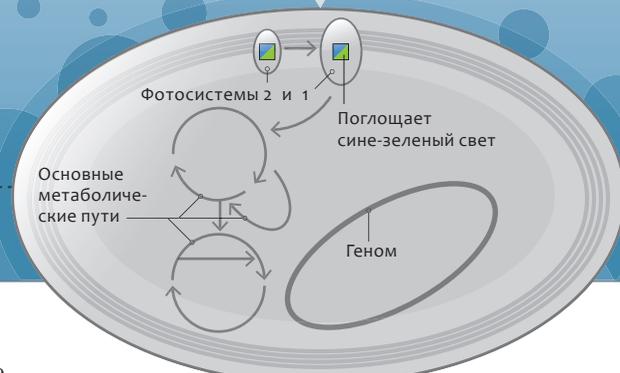
Относительная распространенность

Низкая → Высокая



В ходе дивергенции *Prochlorococcus* от древних цианобактерий его геном укорачивался и претерпевал изменения, сказывавшиеся на метаболических путях, в результате которых он приобретал способность превращать солнечную энергию в питательные вещества; отходы жизнедеятельности высвобождались в окружающую среду. Сначала этот микроорганизм использовал для фотосинтеза сине-зеленую область спектра, а затем произошел сдвиг в сторону синего цвета.

Цианобактерия-прародительница



Цианобактерия-прародительница

Тесно взаимодействующие клетки тоже конкурируют за ресурсы, однако полученные недавно генетические данные свидетельствуют о том, что в целом эволюция способствует специализации и сотрудничеству. Подобно тому как мировая экономика наращивает капитал на локальных ресурсах и обмене товарами, микробные сообщества, обитающие в грунтовых водах и морских глубинах, прибегают к разделению труда для эффективного использования ресурсов разрозненных источников, делая не очень-то благоприятную среду пригодной для жизни.

Каким же образом возникло это жизненно важное сотрудничество? Некоторые исследователи полагают, что основным фактором была физическая близость микроорганизмов в условиях высокой плотности. Потомки тесно прижатых друг к другу микробов оказываются в таких же условиях. С близостью приходит необходимость совместного использования родительских ресурсов. Естественный отбор благоприятствует генам, которые отвечают за выработку такого ресурса, если последующие поколения по-прежнему находятся в замкнутом пространстве, но как только физическая сближенность потомков и родителей уменьшается и начинается генетическая дивергенция клеток, появившиеся мутанты-приживалы приобретают селективные преимущества. Они получают все выгоды совместного использования ресурсов, ничего не отдавая взамен, и суммарная скорость обмена веществом и энергией в сообществе уменьшается. Такое развитие событий показывает, что сотрудничество и взаимообмен благоприятны, когда многие поколения одних и тех же видов остаются тесно связанными, — принцип, называемый групповым отбором.

Но можно ли считать механизм группового отбора единственным объяснением широкой распространенности кооперативных микробных сообществ на земном шаре или есть другие факторы? Поиски ответа привели нас к расположенным на сотни метров выше глубоководных метановых источников обширным площадям поверхностных водных слоев в открытом океане, где солнечной энергии более чем достаточно, но жизненно важных питательных веществ — азота, фосфора и других — не хватает. Тропические и субтропические поверхностные воды долгое время считались океанскими «пустынями», но в конце 1970–1980-х гг. в них были обнаружены мириады микроорганизмов. Как и у недавно идентифицированных в грунтовых водах и осадочных породах на морском дне бактерий, у этих обитателей поверхностных вод геном имел небольшую длину и они не росли в культуре без добавления сложного набора питательных веществ — признак того, что для выживания им нужны были другие виды микробов. Здесь есть одно «но»: если в осадочных

породах микроорганизмы соседствовали друг с другом — идеальное условие для группового отбора! — то обитатели поверхностных вод находились в свободном плавании, постоянно меняя среду обитания. В таких условиях групповой отбор не работал, должны были существовать какие-то другие силы.

Партнерство, изменяющее жизнь

В капле воды с поверхности тропического океана содержится примерно 1 млн микробов. Одна десятая из них — цианобактерии (сине-зеленые водоросли) *Prochlorococcus*, самые маленькие и многочисленные фотосинтезирующие микроорганизмы на планете. Один из нас (Рогир Браакман) с коллегами тщательно проанализировал геном этого «существа», чтобы понять, как эволюционировал его метаболизм в течение сотен миллионов лет. В результате с помощью картирования изменений в метаболических цепях — биохимических реакциях, в ходе которых питательные вещества превращаются в строительные блоки клеток, — было построено метаболическое древо. Сопоставив это древо с освещенностью и наличием питательных веществ в местах обитания цианобактерий, ученые увидели, что в ходе эволюции происходил отбор клеток, которые получали больше света и могли добывать больше питательных веществ. А поскольку при увеличении количества энергии повышался уровень метаболизма углерода, клетки становились буквально насыщенными им. Избыток высокоэнергетических молекул и углерода органического происхождения высвобождался из клетки, как мусор из вакуумного пылесоса, и служил пищей для других организмов. Таким образом, *Prochlorococcus* играла роль клеточной фабрики, поглощая солнечный свет и высвобождая продукт жизнедеятельности — органический углерод.

Такие отходы, в свою очередь, становились ценным ресурсом для микроорганизмов, которые не могли сами синтезировать высокоэнергетические вещества (в частности, для *Pelagibacter*) и которых в поверхностных органических водах было не меньше, чем *Prochlorococcus*. Для того чтобы исследовать взаимоотношения этих двух групп микроорганизмов, мы построили метаболическое древо для *Pelagibacter*, что позволило идентифицировать метаболический путь, замыкающий коллаборативную цепь. *Prochlorococcus* поглощают углекислый газ и высвобождают вещества, содержащие органический углерод, а *Pelagibacter* метаболизируют последние и выделяют другие соединения, которые *Prochlorococcus* могут использовать как источники энергии, при недостатке солнечного света. Оба партнера перерабатывают отходы (продукты жизнедеятельности) друг друга, выделяя энергию, которая без подобного партнерства была бы никому не нужна.

Эти результаты, опубликованные в 2017 г., имеют большую ценность в контексте осмысления эволюции микробных сообществ, обитающих у поверхности океана. Вывод таков: клетки, наиболее изощренные в сборе недостающих питательных веществ, снижают их концентрацию в окружающей среде до предела, диктуя всем остальным организмам, как их добывать. У свободно плавающих микроорганизмов шансы невелики, поскольку клетки, способные только потреблять органический углерод, менее приспособлены к приобретению других питательных веществ — азота, фосфора и т.д. Потребление питательных веществ и высвобождение органических отходов взаимосвязаны невероятно сложным образом, укрепляя партнерство между *Prochlorococcus* и *Pelagibacter*, которое становится более прочным благодаря естественному отбору. Такая расстановка сил показывает, что эволюционная поддержка кооперации имеет место не только в сообществах близкородственных микроорганизмов. По крайней мере в нескольких случаях селективный процесс — это побочный

Наличие плотной сети взаимодействий в мире микробов может означать, что антропогенные изменения окружающей среды способны затрагивать всю биосферу и иметь последствия, о которых мы пока ничего не знаем

продукт (нечто вроде самоподдерживаемой обратной связи) отбора на уровне разрозненных клеток.

Партнерство между *Prochlorococcus* и *Pelagibacter* могло возникнуть в результате совсем небольших генетических изменений, но привести к долговременным колоссальным трансформациям. Когда 600–800 млн лет назад предки *Prochlorococcus* и *Pelagibacter* колонизировали океаны, их воды были практически лишены кислорода, но богаты железом. Железо — непрменный компонент фотосинтезирующих белков, которые в конечном счете вырабатывают кислород, но оно не может разлагать белки и встраиваться в их молекулы, когда вокруг полно кислорода. Это стечение обстоятельств могло бы помочь удерживать фотосинтезирующие организмы от проникновения в открытый океан, где железа в доступной форме становилось бы мало, если бы они, поднявшись наверх, начали вырабатывать кислород. Но отходы органического углерода, выделяемые *Prochlorococcus*, обладают замечательной способностью связывать железо, повышая его доступность даже в присутствии

кислорода. Итак, мы полагаем, что благодаря взаимосвязи органических отходов и дефициту железа *Prochlorococcus* и *Pelagibacter* в конце концов смогли проложить дорожку к оксигенации океанов нашей планеты через фотосинтез.

Скрытые мотивы

Взаимодействие микроорганизмов не всегда бывает дружественным. Есть мнение, что устойчивое взаимовыгодное партнерство — это скорее исключение. «Принцип "Человек человеку волк" никто не отменял, — говорит биолог Джон Маккатчен (John McCutcheon) из Монтанского университета. — Даже взаимоотношения, взаимовыгодные в одних условиях, могут приводить к конкуренции и паразитизму в других, немного отличающихся обстоятельствах». Гоббсовская точка зрения Маккатчена проистекает отчасти из феномена, который он исследовал: речь идет об эндосимбиозе, полном поглощении одного организма другим. Так, митохондрия, «энергетическая фабрика» клеток, когда-то была самостоятельным организмом, членом группы под названием «альфапротеобактерии». Эндосимбиоз стал одним из важнейших поворотов в истории земной жизни, который наметил пути эволюции растений и животных. «Отталкиваясь от этих положительных примеров, легко представить эндосимбиоз как некое обобществление, — говорит Маккатчен. — Но я думаю, что здесь скорее имеет место эксплуатация». По его мнению, эволюция полна неудачных примеров эндосимбиоза, когда он ведет либо к хищничеству, либо к паразитизму.

Науке известны и многочисленные примеры выхода из эндосимбиоза, когда партнер, который перестает выполнять свои обязанности, заменяется другим. Работа Маккатчена служит еще одним примером того, что взаимодействие микроорганизмов — превалирующий фактор до тех пор, пока его мотивация не вызывает подозрений. «Каждый организм работает на себя, — замечает он. — И не все взаимодействия выгодны для каждого».

Не исключено, однако, что у совместного существования микроорганизмов есть обратная сторона: если один из членов подвергается какому-то сильному неблагоприятному воздействию, то оно может распространиться на всю сеть и последняя распадется. Теоретически метаболическая взаимосвязь делает коллективные системы более устойчивыми, но из этого правила могут быть исключения.

Микробиолог Эшли Шейд (Ashley Shade) из Университета штата Мичиган с коллегами проанализировали образцы 378 почв, морской и пресной

воды, микробиома кишечника животных, пытаюсь сформулировать общие принципы устойчивости микробных сообществ к внешним воздействиям и способности возвращаться после этих воздействий в прежнее состояние. Оказалось, что, по данным 56% работ, после возмущения в системе происходят метаболические изменения. Так, под действием тепла одно из почвенных микробных сообществ перестает поглощать азот. Всего 10% из числа этих сообществ в конце концов восстанавливают изначальную активность. Вообще говоря, биосфера необычайно «эластична» и почти всегда возрождается (иначе нас не было бы на Земле), но как работает механизм восстановления, насколько быстро это происходит и какие долговременные последствия остаются — во многом неизвестно.

Мы очень мало знаем о микробных сообществах, находящихся у истоков нашего мира, и о роли сотрудничества в них. На сегодня можно предположить, что движущей силой эволюции выступает тесное метаболическое партнерство. Но биологи только сейчас начинают по-настоящему исследовать феномен кооперации за пределами мира микробов. Многие ли виды способны к кооперативному существованию? Как основные принципы этого

феномена формируют взаимоотношения между членами сообщества в разных условиях и разных временных и пространственных масштабах? Наличие плотной сети взаимодействий в мире микробов может означать, что антропогенные изменения окружающей среды способны затрагивать всю биосферу и иметь последствия, о которых мы пока ничего не знаем. Поиски ответов на все эти вопросы особенно важны в эпоху глобальных изменений нашего мира. ■

Перевод: Н.Н. Шафрановская

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Carbonate-Hosted Methanotrophy Represents an Unrecognized Methane Sink in the Deep Sea. Jeffrey J. Marlow et al. in *Nature Communications*, Vol. 5, Article No. 5094; October 14, 2014.
- Metabolic Evolution and the Self-Organization of Ecosystems. Rogier Braakman et al. in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 114, No. 15, pages E3091–E3100; April 11, 2017.

Выходит 6 раз в год

Познавательный журнал для хороших людей

Дочь денисовца и неандерталки, по версии *Science*, – в десятке главных научных прорывов года

Изучение алтайского палеолита «взорвало» привычные представления о путях становления современного человечества

По мнению лауреата премии «Глобальная энергия» академика С. В. Алексеенко, наиболее перспективным энергетическим источником служит тепло земных глубин

Катастрофические вулканические извержения, влияющие на климат Земли, происходят чаще, чем считалось, – в среднем один раз в столетие

Древний и современный, многогранный и многоликий Китай глазами историка и археолога

www.scfh.ru

АСТРОНОМИЯ

НАЗАД ВО

A cosmic background featuring a dense field of stars and a prominent blue nebula or filamentary structure on the left side. The overall color palette is dark with highlights of blue and white.

ВРЕМЕНИ

**Астрономы обнаружили
во Вселенной несколько
самых удаленных
галактик, открывающих
окно в ранее
неизвестный период
истории космоса**

Дэн Коу

ОБ АВТОРЕ

Дэн Коу (Dan Coe) — астроном Института исследований космоса с помощью космического телескопа в Балтиморе, научный руководитель программы RELICS — изучения эпохи реионизации с помощью гравитационных линз, образованных скоплениями галактик.



МЫ СТОИМ НА ПОРОГЕ

важнейшего события в астрономии — составления почти полной истории космоса. Астрономы на сегодня проследили галактики на временном участке, составляющим 97% времени до Большого взрыва, который произошел 13,8 млрд лет назад.

Свет от одной из таких галактик, получившей имя *SPT0615-JD*, начал свое путешествие к Земле 13,3 млрд лет назад. В 2017 г. он прибыл к зеркалу космического телескопа «Хаббл», где мы впервые смогли наблюдать эту галактику в рамках возглавляемого мною проекта под названием *RELICS (Reionization Lensing Cluster Survey, Обзор скоплений, линзирующих эпоху реионизации)*, цель которого — обнаружить некоторые из самых первых галактик в космосе. Программа *RELICS* продолжалась с октября 2015 г. по октябрь 2017 г., включая более 100 часов наблюдений с помощью телескопа «Хаббл» и более 900 часов — с помощью космического телескопа «Спитцер». В рамках этого проекта было выявлено более 300 галактик, которые, возможно, образовались в первый миллиард лет существования Вселенной.

Эти объекты вызывают особый интерес, поскольку они позволяют взглянуть в «серебряный век» нашей истории, который пока еще полностью остается загадкой. Изучая такие объекты, мы надеемся узнать, как сформировались первые галактики и как они повлияли на процессы в зарождающейся Вселенной. Например, мы считаем, что такие галактики, как *SPT0615-JD*, преобразовали юную Вселенную, испуская ультрафиолетовое излучение, которое поглощал окружающий их газ, вновь превращая первые нейтральные атомы Вселенной в разрозненные протоны и электроны, из которых

они первоначально и возникли (процесс, получивший название «реионизация»). Однако детали того, как это происходило и когда этот процесс имел место, все еще неясны. При удачном стечении обстоятельств наблюдение древних галактик все изменит.

Первые галактики

Древние галактики были совсем не похожи на те, что мы знаем сегодня. Первые галактики были более примитивными и состояли в основном из газообразного водорода и гелия. Со временем звезды

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Недавние эксперименты, названные RELICS (Обзор скоплений, линзирующих эпоху реионизации), нацелены на поиск первых галактик в истории космоса.
- В проекте были использованы гравитационные линзы — области, где массивные космические объекты искривляют путь, по которому распространяется свет, и увеличивают изображение далекого объекта.
- В рамках проекта RELICS было открыто более 300 древних галактик, включая галактику, возраст которой составляет 13,3 млрд лет.



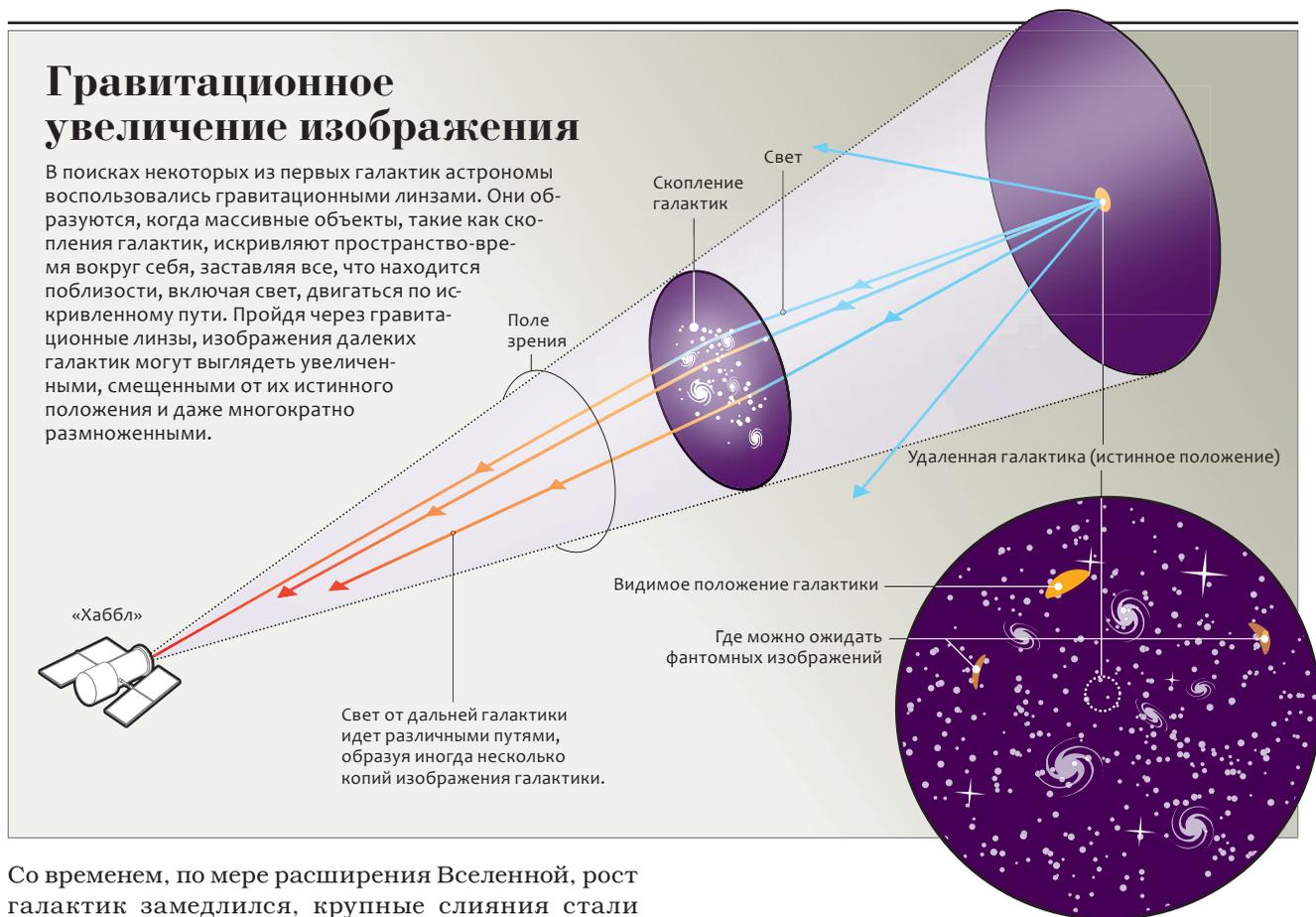
Красное расплывшееся пятно: едва различимое пятно на фотографии, полученной космическим телескопом «Хаббл», — SPT0615-JD, одна из самых далеких известных нам галактик

синтезируют из этих атомов более тяжелые элементы, и когда звезды умирали во взрывах сверхновых, тяжелые элементы рассеивались по галактикам, обогащая их «звездным веществом», включая элементы, необходимые для зарождения жизни. Первые галактики еще только должны будут превратиться в величественные спиральные образования или в одутловатые эллиптические шары, похожие на те, что мы сегодня видим вокруг нас. Они были намного более разупорядоченными и гораздо меньше размером (что делает

задачу их обнаружения еще более трудной). Самые первые галактики из тех, которые мы наблюдали, были размером примерно в 1% от размера нашего Млечного Пути, но они быстро росли, формируя новые звезды с поразительной скоростью. Топлива в то время было предостаточно; ранние галактики буквально купались в прохладных струях газообразного водорода, притягиваемого к ним гравитацией. Галактики часто сталкивались друг с другом и сливались воедино, что ускоряло их рост и порождало вспышки формирования звезд.

Гравитационное увеличение изображения

В поисках некоторых из первых галактик астрономы воспользовались гравитационными линзами. Они образуются, когда массивные объекты, такие как скопления галактик, искривляют пространство-время вокруг себя, заставляя все, что находится поблизости, включая свет, двигаться по искривленному пути. Пройдя через гравитационные линзы, изображения далеких галактик могут выглядеть увеличенными, смещенными от их истинного положения и даже многократно размноженными.



Со временем, по мере расширения Вселенной, рост галактик замедлился, крупные слияния стали происходить реже, а поступление газа уменьшилось.

Эта картина рисует основы нашего понимания истории космоса. Мы все еще работаем, чтобы уточнить детали, и остается еще много вопросов, особенно в отношении самого раннего периода существования Вселенной. Когда именно образовались первые галактики? Насколько велики они были? Как они выглядели? Были ли они «строительными кирпичиками» будущих галактик с одной большой областью звездообразования или же более разрозненными крупными очагами? Рассыпались ли все они на части в результате интенсивного процесса образования звезд или были более спокойными, как большинство нынешних галактик? Было ли у ранних галактик достаточно времени, чтобы сжаться в диски, как это случилось с Млечным Путем, или же они слишком часто сталкивались друг с другом, чтобы это могло произойти? Удастся ли нам когда-нибудь найти галактики, заполненные нетронутыми исходными водородом и гелием, или же первые сверхновые слишком быстро засеяли их тяжелыми элементами? Как быстро росли галактики в числе и по массе? И действительно ли благодаря им произошла реионизация Вселенной? С помощью данных, полученных в рамках программы *RELICS*, мы сделаем еще один шаг к ответу на эти вопросы.

Увеличительные стекла космоса

Чтобы заглянуть как можно дальше в прошлое, в программе *RELICS* используется методика, получившая название «гравитационное линзирование». Мы воспользовались естественными «увеличительными стеклами» в виде массивных скоплений галактик. Эти группы галактик обладают настолько большой массой, что их гравитация, согласно общей теории относительности Эйнштейна, искривляет пространство и время. Когда свет от расположенного на более далеком расстоянии объекта путешествует по Вселенной, он следует по искривленному пространству-времени вокруг скопления, фокусируясь при движении по этому пути.

Когда свет достигает Земли, далекие объекты выглядят искаженными и вытянутыми, а иногда видны одновременно несколько изображений одного и того же объекта. Если этот эффект покажется вам абстрактным, вы можете увидеть схожий пример на расстоянии не далее вашего следующего бокала вина. Посмотрите на зажженную свечу через основание бокала, и вы увидите несколько изображений увеличенного в размерах пламени свечи.

Такие увеличенные изображения галактик ярче и на них различимы более мелкие детали, чем

на обычных, что позволяет нам лучше изучить их свойства. Другое преимущество наблюдения сильно увеличенных областей неба заключается в том, что мы находим далекие галактики более эффективно, чем просто просматривая «пустые» участки, такие как известные «сверхглубокие поля» (*детальное изображение небольшой области неба. — Примеч. пер.*) космического телескопа «Хаббл». Такой результат неочевиден, и в действительности существует компромисс.

Гравитационное увеличение позволяет рассмотреть более тусклые галактики. Но при этом в поле зрения попадает область меньшего размера, содержащая меньше галактик. Какой эффект в результате одерживает победу? Гравитационное увеличение побеждает, когда при наблюдении в поле зрения попадает много тусклых галактик и тем самым компенсируется уменьшение области обзора. В юной Вселенной небольшие тусклые галактики были многочисленными, а значит, мы обнаруживаем намного больше далеких галактик, отыскивая на снимках изображения, сильно увеличенные за счет гравитационных линз, образованных скоплениями галактик.

В трех самых крупных программах «Хаббла», выполненных за прошедшие семь лет, для поиска далеких галактик использовалась гравитационная фокусировка скоплениями галактик. Эти программы проводились совместно с космическим телескопом «Спитцер», который ведет наблюдения в инфракрасном диапазоне излучения с длинами волн большими, чем «Хаббл». В ходе продолжавшейся три года первой программы, *CLASH (Cluster Lensing and Supernova Survey with Hubble*, Обзор фокусирующих скоплений и сверхновых с помощью «Хаббла»), которую возглавлял Марк Постман (Marc Postman) из Института исследований космоса с помощью космического телескопа (STScI) в Балтиморе, изучались 25 скоплений галактик. Я помогал в написании предложений и анализе снимков — и в 2012 г. обнаружил *MACS0647-JD*,

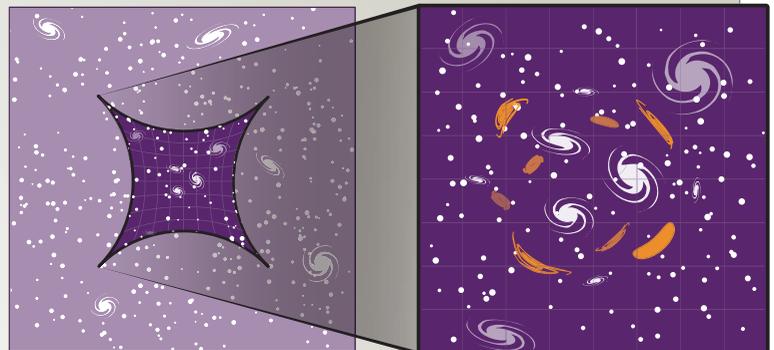
галактику, которую мы видим в период спустя всего 420 млн лет после Большого взрыва. Это реальный кандидат на звание одной из самых удаленных из известных галактик, чей рекорд был побит только в 2016 г., когда Паскаль Оуш (Pascal Oesch) из Йельского университета обнаружил галактику по крайней мере на 20 млн лет старше, на этот раз в рамках программы *CANDELS (Cosmic Assembly Near-Infrared Deep Extragalactic Legacy Survey*, Изучение в ближнем ИК-диапазоне формирования далеких внегалактических объектов) — продолжительного (*непрерывно в течение примерно двух месяцев, когда «Хаббл» совершил 902 облета Земли. — Примеч. пер.*) сканирования «Хабблом» относительно пустых участков звездного неба, в которых практически отсутствует гравитационная фокусировка.

После удачного завершения проекта *CLASH* я помог убедить руководителя «Хаббла», которым в то время был Мэтт Маунтин (Matt Mountain), включить скопления галактик в следующую большую программу «Хаббла» «Приграничные области» (*Frontier Fields*), возглавляемую Дженнифер Лоц (Jennifer Lotz) из STScI. Этот проект следовал по пути, проторенному предыдущей программой «Хаббла» — «Глубокие поля», в рамках которой наблюдение небольших участков неба велось в течение многих дней. Эти более ранние программы были направлены на изучение самых пустынных областей звездного неба, которые ученые только смогли найти, таких, где нет относительно ярких «близких» галактик (на расстоянии каких-нибудь нескольких миллиардов световых лет), способных помешать наблюдению более удаленных областей Вселенной.

Первое изображение, полученное с помощью «Хаббла» в рамках программы «Глубокое поле» путем наложения 342 фотоснимков, полученных в течение десяти дней в 1995 г., стало настоящим откровением: на пустом крошечном кусочке звездного неба размером с песчинку, рассматриваемую

Две стратегии

В поисках галактик астрономы могут воспользоваться двумя подходами. Первый — вглядываться в кажущийся «пустым» участок неба. Другой, использованный в проекте *RELICS*, — наблюдать области, в которых присутствуют массивные скопления галактик, чтобы воспользоваться ими как гравитационными линзами. Такая стратегия использует меньшее и искаженное по форме поле зрения (поскольку гравитационные линзы увеличивают изображение участка неба), но позволяет увидеть галактики, которые иначе никак не рассмотреть в силу их слабой яркости.



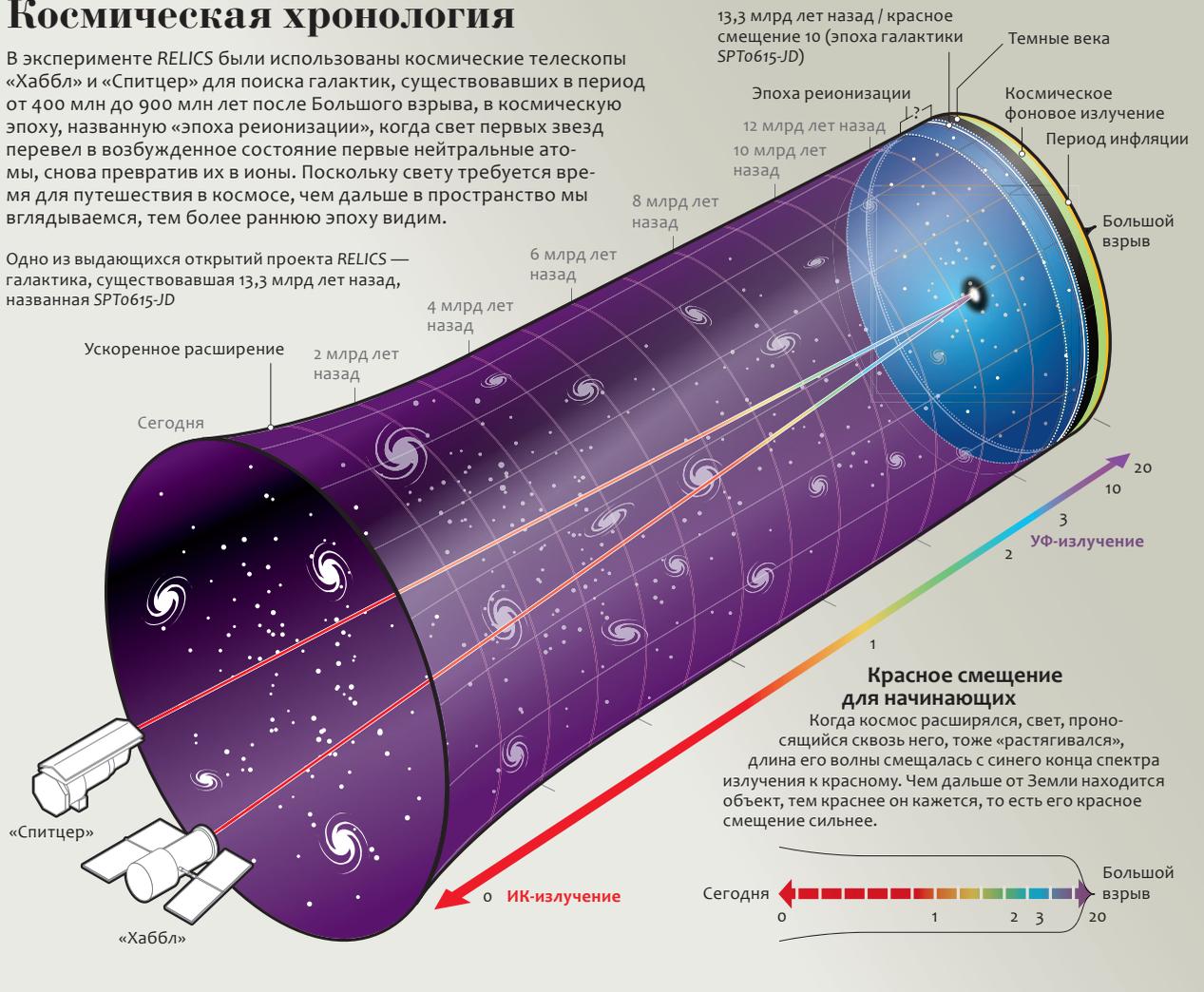
Исходное поле зрения

Линзированное поле зрения

Космическая хронология

В эксперименте *RELICS* были использованы космические телескопы «Хаббл» и «Спитцер» для поиска галактик, существовавших в период от 400 млн до 900 млн лет после Большого взрыва, в космическую эпоху, названную «эпоха реионизации», когда свет первых звезд перевел в возбужденное состояние первые нейтральные атомы, снова превратив их в ионы. Поскольку свету требуется время для путешествия в космосе, чем дальше в пространство мы выглядываемся, тем более раннюю эпоху видим.

Одно из выдающихся открытий проекта *RELICS* — галактика, существовавшая 13,3 млрд лет назад, названная *SPT0615-JD*



с расстояния вытянутой руки, были различимы 3 тыс. галактик. Участки для наблюдений в рамках последующих программ «Хаббла» «Глубокое поле Южного полушария» и «Сверхглубокое поле» аналогичным образом были тщательно подобраны, чтобы избежать близкого соседства галактик. Программа «Приграничные области» дерзко нарушила сложившуюся традицию: в ее ходе были получены глубокие изображения шести областей с самым большим сосредоточением галактик на расстоянии от 3 до 5 млрд световых лет. В рамках этого проекта велись также наблюдения шести расположенных поблизости относительно пустых областей, скорее чтобы поддержать традицию предыдущих программ по изучению дальнего космоса. С многократно усилившимся за счет гравитационных линз потенциалом космических телескопов «Хаббл» и «Спитцер» в ходе программы «Приграничные области» были обнаружены самые маленькие и самые тусклые галактики из когда-либо наблюдавшихся.

Следы из прошлого

После завершения проекта *CLASH*, когда полным ходом шла работа по программе «Приграничные области», было неясно, одобряют ли астрономы еще одну крупную программу наблюдения скоплений галактик с помощью «Хаббла». Но я обнаружил, что множество массивных скоплений так и не наблюдалось «Хабблом» в ближней ИК-области, в которой далекие галактики должны бы быть видны. (При расширении Вселенной под действием эффекта Доплера длина волны излучения от далеких объектов смещается в область более длинных, красных волн — явление, называемое красным смещением.) Я открыл множество природных «телескопов», в которые еще только предстоит взглянуть в наших поисках галактик, существовавших в первый миллиард лет.

Я выудил эти скопления из каталога, выпущенного в 2015 г. в рамках программы космического телескопа «Планк» Европейского космического агентства. Телескоп «Планк» больше известен

своими подробными изображениями космического фонового (реликтового) микроволнового излучения — самого раннего наблюдаемого излучения во Вселенной. Но с его помощью был также составлен каталог из более чем 1 тыс. массивных скоплений галактик по их искривляющему влиянию на реликтовое излучение. Большинство из этих скоплений были уже хорошо известны, однако многие стали открытиями. Я обнаружил, что самое массивное скопление в каталоге, *Abell 2163*, «Хаббл» наблюдал только в видимой, но не в ближней инфракрасной области. Второе по массе скопление — *PLCK G287.0+32.9*, одно из недавно открытых телескопом «Планк», — проявило себя в качестве отличной гравитационной линзы при получении изображений с помощью наземных телескопов, но «Хаббл» еще только предстояло взглянуть на него.

Я подготовил список из 41 массивного скопления галактик, которые «Хаббл» еще не фотографировал в ближнем ИК-диапазоне, и собрал команду астрономов, чтобы составить обширный план по их наблюдению. Мы попросили предоставить нам возможность использовать «Хаббл» в течение 190 его оборотов вокруг Земли — примерно 5% времени для сторонних наблюдений, выделенного в том году, что составило более 100 часов. Когда предложения по «Хаббл» были подготовлены, астрономы со всего света собрались в Балтиморе, чтобы совместно их обсудить. Наша группа была рада узнать, что в июне 2015 г. наше предложение было принято как самая большая программа аренды времени «Хаббла» сторонними институтами на 23-м году работы космического телескопа.

В рамках программы *RELICS* были проведены наблюдения всех 41 скопления в ИК-канале широкоугольной камеры (*WFC3/IR*) «Хаббла». Мы также наблюдали их в красном, зеленом и синем диапазонах видимого излучения (если не наблюдали их ранее) с помощью Усовершенствованной обзорной камеры (*ACS*). Полученные этой камерой изображения с высоким разрешением помогли нам измерить параметры гравитационной линзы, создаваемой скоплением, и оценить степень увеличения изображений далеких галактик, обнаруженных на снимках, полученных с помощью *WFC3/IR*. Мы вели наблюдения на семи различных длинах волн от 0,4 до 1,7 мкм, что позволяло нам выделять составляющие цвета излучения каждой из этих галактик. Просматривая известные характеристики излучения, такие как характерные длины волн, которые поглощает нейтральный водород, мы можем оценить красное смещение света галактики, а значит и то, насколько далеко от нас она находится.

По предложению Маруши Брадач (Maruša Bradac) из Калифорнийского университета в Дейвисе при важном содействии со стороны руководителя программы «Спитцер» Тома Соифера (Tom

Soifer) в качестве награды нам было предоставлено 945 часов наблюдений с помощью космического телескопа «Спитцер». Диапазон длин волн, регистрируемых «Спитцером», дает более полный набор характеристик звезд в ранних галактиках, позволяя измерить их звездные массы и то, действительно ли они находятся так далеко, как это показывают снимки, сделанные «Хабблом».

Открытие

Галактика *SPT 0615-JD* явила себя в 2017 г. астроному-стажеру по имени Бретт Салмон (Brett Salmon), которого я вместе с заместителем научного руководителя программы *RELICS* из Института исследований космоса с помощью космического телескопа Ларри Брэдли (Larry Bradley) принял на работу. Эта галактика не была сразу же отмечена на снимках «Хаббла» как уникальный объект, каковой она в действительности собой представляет. Галактики могут казаться нам красными по разным причинам. У некоторых, таких как *SPT0615-JD*, большое красное смещение. Другие окутаны пылью, которая поглощает голубой свет и затем переизлучает энергию в виде инфракрасного излучения, заставляя галактики выглядеть более красными, чем они есть на самом деле. Другие же красные галактики просто старше — они давно не формировали достаточного количества новых звезд, а те, которые остались, — это старые красные звезды (*красные карлики и красные гиганты*. — *Примеч. пер.*). Галактики могут выглядеть или быть таковыми в результате любой комбинации этих причин: красное смещение, пылевое окружение и преклонный возраст.

Наблюдения «Спитцера» в диапазоне от 3 до 5 мкм критически важны для того, чтобы помочь отличить далекие галактики с красным смещением от более близких к нам галактик, которые красны по своей природе и кажутся даже более яркими на длинах волн, регистрируемых «Спитцером». На самом деле первоначально на наших фотоснимках с «Хаббла» мы отметили три возможные старые галактики (включая и *SPT0615-JD*), которые характеризовались красным смещением (значением величины z), равным примерно 10, что указывало на время, когда Вселенной было менее чем 500 млн лет от роду, то есть более 13 млрд лет назад. Однако анализ фотографий со «Спитцера» показал, что две из них, скорее всего, имеют красное смещение около 2, то есть они запечатлены в то время, когда Вселенной было «всего» 10 млрд лет (примерно три четверти нынешнего возраста). Галактика *SPT0615-JD* успешно выдержала анализ «Спитцера» в качестве кандидата на красное смещение, равное 10.

Сочетая анализ фотоснимков с «Хаббла», проведенный Салмоном, с анализом данных со «Спитцера», выполненным Викторией Стрейт (Victoria Strait) из Калифорнийского университета

в Дейвисе, мы обнаружили, что излучение галактики *SPT0615-JD* отсекается на длине волны примерно 1,34 мкм, и меньше этой длины волны излучения нет. Это излучение было поглощено, когда оно возбуждало газообразный водород младенческой Вселенной или повторно его ионизировало, снова превратив нейтральные атомы в ионы. Такой резкий обрыв в спектре излучения галактики *SPT0615-JD* оказался весьма полезным, поскольку он позволяет нам измерить расстояние до нее. Хотя мы наблюдаем этот обрыв на длине волны примерно 1,34 мкм, мы знаем, что нейтральный водород поглощает излучение крайней ультрафиолетовой области с длиной волны менее 0,1216 мкм. Соотношение между исходным и наблюдаемым отсечением в спектре излучения галактики *SPT0615-JD* показывает точно, насколько Вселенная расширилась и насколько сместилась длина волны излучения галактики, следовательно, как далеко она находится.

Космический телескоп им. Джеймса Уэбба почти наверняка увидит галактики, существовавшие спустя 300 млн лет после Большого взрыва, гравитационные линзы же позволяют нам увидеть галактики, существовавшие в первые 200 млн лет, сократив наш пробел в истории наполовину

Мы наблюдаем *SPT0615-JD* с красным смещением, равным 10, в ту пору, когда Вселенная была в возрасте всего 3,5% от теперешнего. Такая датировка делает галактику *SPT0615-JD* одной из самых старых среди обнаруженных. Известно, что две другие галактики расположены еще чуть дальше и имеют красное смещение 11, мы видим их в то время, когда Вселенной было 400 млн лет. Но «Хаббл» показывает эти галактики просто как инфракрасные точки, слишком маленькие, чтобы мы могли разглядеть какие-нибудь детали их внутренней структуры. Галактика *SPT0615-JD* — особая. Ее свет был усилен и увеличен гравитационной линзой, что позволило нам более детально рассмотреть столь раннюю галактику.

Возможно, на имеющихся у нас изображениях она выглядит не очень четко, но мы надеемся с помощью «Хаббла» получить изображения более глубокого космоса, чтобы раскрыть больше деталей и обнаружить менее яркие многократные изображения этой галактики, образованные гравитационной линзой, которые были предсказаны Рейчел Патерно-Малер (Rachel Paterno-Mahler) из Калифорнийского

университета в Ирвайне. У нас на руках есть также уже утвержденная программа наблюдений с помощью *ALMA* (Атакамской большой антенной решетки миллиметрового диапазона), которая, как мы полагаем, подтвердит наши измерения расстояний и позволит найти там кислород, что станет самым ранним обнаружением такого тяжелого элемента. Мы также предложим провести наблюдения с помощью флагманской обсерватории NASA следующего поколения, Космического телескопа им. Джеймса Уэбба (*JWST*), который, возможно, представит нам детальные снимки внутренней структуры галактики, измерит ее вклад в реионизацию и раскроет химический состав — состоит ли она только из исходного водорода и гелия или же обогащена более тяжелыми элементами.

Галактика *SPT0615-JD* стала самым заметным открытием программы *RELICS*, но мы нашли также и более 300 возможных кандидатов в список древних галактик (это еще требует подтверждения), уже сиявших в первый

миллиард лет существования Вселенной. Среди них — самые яркие из известных галактики, относящиеся к тому раннему времени, которые дают нам возможность изучать их в мельчайших деталях. Поначалу я нашел это неожиданно, поскольку наземные телескопы многократно проводили изучение большой части звездного неба. Но после проведения рас-

четов на компьютерах эти результаты уже не выглядят сюрпризом. Используя «Хаббл», «Спитцер» и помощь гравитационных линз, мы в рамках программы *RELICS* смогли открыть более яркие галактики на столь большом расстоянии.

Пробел в нашей истории

Древние галактики, которые мы находим в рамках программы *RELICS*, помогают заполнить пробел в книгах космологической истории. Существует фундаментальная теория, описывающая первые моменты времени, когда в результате Большого взрыва образовалась Вселенная и пространство стало быстро расширяться в период, названный стадией инфляции. Спустя примерно 380 тыс. лет после зарождения пространства и времени Вселенная остыла достаточно для того, чтобы образовались первые атомы и свободно распространялось излучение. Мы видим сегодня его отголоски в виде реликтового излучения.

Все предшествующее тому, что запечатлено на этой фотографии, остается пробелом в 400 млн лет в нашей истории. Нам по-прежнему необходимо

увидеть хотя бы один объект, существовавший в то время. Эти 3% истории космоса остаются для нас белым пятном. Тем не менее мы знаем, что время это было насыщено событиями. Первые звезды сформировались, вероятно, через 100 млн лет после Большого взрыва. Затем, как мы полагаем, звезды начали группироваться, в конце концов образовав первые галактики. Свет от этих галактик вырвался наружу и разметал атомы водорода, ионизировал их и выпустил на свободу их электроны.

Выяснение того, как шли процессы формирования Вселенной, путем изучения таких галактик критически важно для того, чтобы заполнить недостающие страницы ее истории. *RELICS* и проекты, которые были осуществлены до него, такие как *CLASH*, *CANDELS* и «Приграничные области», — это большие шаги, но мы работаем в ожидании большого прыжка, когда будет запущен Космический телескоп им. Джеймса Уэбба. Эта обсерватория, которую планируется запустить в 2021 г., станет самым мощным инструментом из когда-либо использованных человечеством для того, чтобы проникнуть взором в самые ранние периоды существования Вселенной. Ведя наблюдения с помощью зеркала большего диаметра на более длинных длинах волн, чем предыдущие телескопы, он сможет увидеть более далекие галактики с лучшим разрешением, чем любая обсерватория до него. Он должен суметь определить массы и химический состав этих галактик, а также их вклад в реионизацию.

В такой же степени, как гравитационные линзы помогли нам отыскать далекие галактики с помощью нынешних телескопов, я ожидаю, что с вводом в строй Космического телескопа им. Джеймса Уэбба эта помощь окажется существеннее для поиска галактик, у которых красное смещение еще больше. Заглядывая далеко вглубь времен, мы обнаруживаем, что доля более мелких галактик растет все больше и больше по отношению к их общему числу. Если эта тенденция сохраняется и в первые 400 млн лет, преимущества, которые дают нам гравитационные линзы, станут еще ощутимее. Основываясь на современных оценках, я выскажу прогноз, что гравитационные линзы станут ключевым инструментом, с помощью которого *JWST* обнаружит самые первые галактики во Вселенной.

Космический телескоп им. Джеймса Уэбба почти наверняка увидит галактики, существовавшие спустя 300 млн лет после Большого взрыва, и у меня есть веские основания предполагать, что гравитационные линзы позволят нам увидеть галактики, существовавшие в первые 200 млн лет, сократив наш пробел в истории наполовину, — это, конечно, если галактики уже успели образоваться так рано.

Нам нужно буквально рыть землю, чтобы успеть к запуску Космического телескопа им. Джеймса Уэбба, поскольку в нашем распоряжении будет,

возможно, всего пять-десять лет, чтобы поработать с ним. Хотя «Хаббл» функционирует всюду уже 28 лет после своего запуска, у *JWST* топлива хватит для поддержания орбиты лишь на десять лет. Это потому, что он будет летать на расстоянии в 1,5 млн км от Земли, слишком далеко, чтобы астронавты могли проводить на нем сервисные работы, ремонтировать или добавлять новые инструменты, как это несколько раз делалось с «Хабблом».

Программа *RELICS* критически важна для того, чтобы с максимальной пользой использовать Космический телескоп им. Джеймса Уэбба, когда тот будет доступен, поскольку в ее рамках уже выявлены несколько самых перспективных галактик для детального изучения с помощью нового телескопа, а также большинство областей звездного неба с эффектом гравитационных линз, в которых *JWST* сможет вести поиск новых галактик.

Оглядываясь назад

Наш Млечный Путь, вероятно, столь же стар, как и галактика *SPT0615-JD*. Разница в том, что мы видим нашу галактику такой, какова она сейчас, и у нас нет никакого представления о том, как она выглядела в очень ранней Вселенной. Поскольку свет от *SPT0615-JD* шел к нам так долго, мы видим ее более молодую «застывшую во времени» копию.

Однако и галактика *SPT0615-JD*, и наша собственная, возможно, имеют схожую историю, разрастаясь в размерах в течение прошедших с тех пор 13 млрд лет. Вероятно, планеты сформировались вокруг звезд и в галактике *SPT0615-JD*. Быть может, на некоторых из тех планет появилась жизнь. Возможно, некоторые представители той жизни эволюционировали в разумных существ, развили культуру, технику, в том числе космические телескопы. Если это так, они, может быть, смотрят на нас сейчас через те же самые скопления галактик, рассматривая аналогичные увеличенные изображения нашей галактики как тусклые красные точки, каким Млечный Путь был вскоре после своего рождения.

Именно в силу такой возможности мы и исследуем приграничные области нашей Вселенной: чтобы узнать о нашем происхождении и в конечном итоге найти самих себя. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Лемоник М. Свет первых звезд // ВМН, № 6, 2014.
- *RELICS: A Candidate $z \sim 10$ Galaxy Strongly Lensed into a Spatially Resolved Arc.* Brett Salmon et al. in *Astrophysical Journal Letters*, Vol. 864, No. 1, Article No. L22; September 1, 2018. <http://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/aad10>
- Сайт эксперимента *RELICS*: <https://relics.stsci.edu>



МАТЕМАТИКА

МАТЕМАТИКИ РАЗРАБАТЫВАЮТ КРИМИНАЛИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ЧТОБЫ ВЫЯВИТЬ ПОЛИТИЧЕСКИЕ МАХИНАЦИИ С ГЕОГРАФИЧЕСКИМИ КАРТАМИ, КОТОРЫЕ ЛИШАЮТ ГРАЖДАН ПРАВА ГОЛОСА

* * * * *

ГЕОМЕТРИЯ

ПРОТИВ ВЫБОРНЫХ МАХИНАЦИЙ

Мун Дючин

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Попытки установить границы избирательных округов так, чтобы это нечестным путем благоприятствовало одной из политических партий, спровоцировали правовые проблемы по всей стране. Но у судов нет реальных нормативов для выявления таких махинаций.
- В последние годы математики вступили в эту перепалку, чтобы разработать статистические методы, которые суды смогут использовать, чтобы вывести на чистую воду мошеннические схемы при нарезке избирательных округов и выступать в качестве экспертов в залах судов и вне их стен.
- Существует так много способов провести границы избирательных округов, что оценка стала трудной задачей с огромным массивом данных даже для самых быстродействующих компьютеров. Однако суды, по всей видимости, склонны согласиться с доводами инструмента, получившего название «метод Монте-Карло по схеме марковской цепи» (МКМЦ), который хорошо справляется с задачей.

ОБ АВТОРЕ

Мун Дючин (Moon Duchin) — доцент математики и старший научный сотрудник Колледжа гражданского общества при Университета Тафтса. Область ее исследований — теория геометрических групп, теория малоразмерных топологических пространств и динамика. Осенью 2016 г. она создала группу «Метрическая геометрия и манипулирование выборами», чтобы привлечь внимание математиков к вопросу пересмотра границ избирательных округов.



Тема манипулирования избирателями в ходе выборов вылилась в залы судебных заседаний и в передовицы новостных изданий по всей стране. Верховный суд США недавно заслушивал дела о конституционности избирательных округов, в которых якобы всегда было сильное преимущество республиканцев в Висконсине и демократов в Мэриленде, однако обе партии стали жертвами прямого мошенничества. Другой случай партийного манипулирования в Северной Каролине раскручивался в августе при настойчивой поддержке со стороны суда низшей инстанции. Однако в рамках закона было невозможно добиться правосудия в делах с манипулированием голосами избирателей. Часть этой проблемы, как заметил в судебном разбирательстве 2004 г. Энтони Кеннеди, состоит прежде всего в том, что как Верховному суду, так и судам низшей инстанции предстоит установить «действительные правовые нормы» для выявления такого рода манипуляций со стороны партий. Именно в этом вопросе мы и можем оказать помощь — считает все большее число математиков.

Два года назад я с друзьями основала рабочую группу по изучению приложений геометрии и вычислительной математики для пересмотра границ избирательных округов в США. С тех пор группа «Метрическая геометрия и манипулирование выборами» (*Metric Geometry and Gerrymandering Group*)

расширила масштаб своей деятельности и круг задач, глубоко погрузившись в исследования, распространение идей, обучение и проведение консультаций. Более 1,2 тыс. человек посетили наши семинары по всей стране, и многие из них активно участвовали в программах по пересмотру границ избирательных округов. Мы полагаем, что пришло время принять меры, основываясь на математических расчетах. Математика манипулирования выборами на удивление многообразна (целесообразно даже выделить в ней отдельные подразделы), а производительность компьютеров, очевидно, уже позволяет решать такие масштабные и сложные задачи по перекройке избирательных округов. Несмотря на техническую ориентацию нашей группы, главная цель, стоящая перед нами, — укрепить и защитить гражданские права. И мы работаем в тесном контакте с юристами, политологами, географами и различными общественными группами, чтобы создать инструменты и выработать идеи в преддверии следующей переписи населения США и процедуры пересмотра границ избирательных округов, которая за ней последует.

В стране, где властью наделяют выбираемых представителей, всегда будут вестись споры по поводу управления электоральным процессом. А в такой системе, как наша палата представителей, где победитель получает все в пределах каждого географического округа, очерчивание границ избирательных округов — естественное поле битвы. История Америки под завязку полна вопиющими примерами мошеннических схем по установлению границ округов таким образом, чтобы в округе преобладали лица, лояльные к существующей власти, — от приписывания к округу лиц, голосующих в пользу действующей власти, до разрезания исторически сложившегося округа на три части, чтобы снизить накал политической силы чернокожих избирателей. Множество вариантов этих так называемых стратегий концентрации и размазывания (*англ. packing — концентрация электората оппозиционной партии в одном-двух избирательных округах, чтобы уменьшить число своих противников в других; cracking — размазывание электората оппозиционной партии по большому числу избирательных округов, чтобы там их оказалось меньше.* — Примеч. пер.) продолжают использоваться и по сей день, и в эпоху больших данных они

стали гораздо более изощренными. Сейчас труднее, чем когда-либо ранее, определить даже сам факт перекройки избирательных округов в чьих-либо корыстных интересах. Люди считают, что могут распознать манипуляции по двум признакам: по странной форме округа и по непропорциональному исходу выборов. Однако и тот и другой ненадежны. Тогда каким же образом нам определить, когда чаши весов намеренно перекошены?

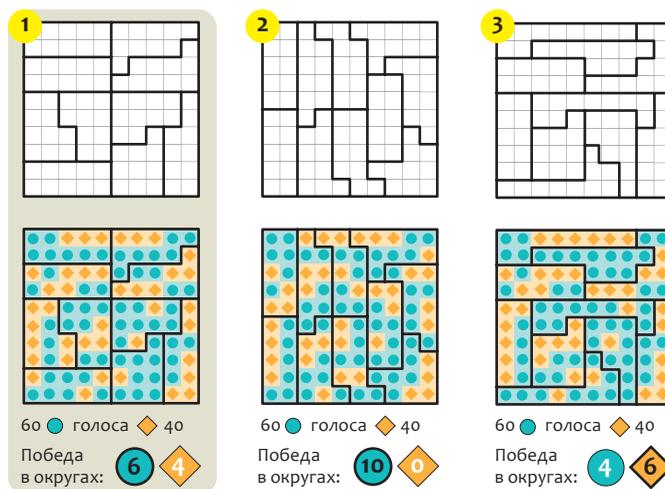
Тестирование на глазок

Эпизод 1812 г., который дал нам слово «джерримендеринг», вырос из интуитивного предположения, что нарезанные странным образом избирательные округа одним своим видом выдают противозаконные умыслы. Происхождение этого слова связано с именем Элбриджа Герри, в ту пору бывшего губернатора Массачусетса. У Герри послужной список одного из отцов-основателей нации — его подпись стоит под Декларацией независимости, он был одним из главных действующих лиц на Конституционном конвенте США, членом конгресса, вице-президентом при Джеймсе Мэдисоне. Поэтому представляется забавным тот факт, что своей прошедшей испытание временем славой он обязан бесчестной перекройке границ избирательных округов. *Gerrymander* («саламандра Герри») было сатирическим названием, которое родилось из-за причудливой формы округа на северном побережье Бостона, что, как считалось, помогло демократическо-республиканской партии губернатора одержать победу над своим соперником в лице федералистов. Сатирическая гравюра политической направленности, была опубликована в *Salem Gazette* в 1813 г.; на ней к контуру избирательного округа с явным намеком были добавлены крылья, когти и клыки, чтобы подчеркнуть его схожесть с чертаниями рептилии.

Таким образом идея, что странная форма избирательного округа дает нам основания подозревать правонарушение, уходит корнями в давнее прошлое, так же как и обратное утверждение, что аккуратно сшитые избирательные округа представляют собой идеал демократии, старо, как сама наша республика. В 1787 г. в своей статье, вошедшей в сборник «Заметки федералиста» (*The Federalist Papers*), Мэдисон писал, что «естественный предел демократии — это расстояние от центральной точки, которое еще позволяет самым удаленным гражданам собираться так часто, как того требуют их общественные функции». Другими словами, избирательные округа должны

Власть шариковой ручки

Для джерримендеринга используют тщательно прорисованные линии, которые разбавляют избирательную волю населения в пользу одной из сторон, собрав сторонников ее соперника в несколько избирательных округов с чрезмерно большим количеством избирателей (концентрация), распределяя их по нескольким избирательным округам так, чтобы они были там в меньшинстве по отношению к сторонникам предпочтительного кандидата (размазывание), или комбинируя оба этих способа.



Сетка разбита на округа, чтобы результат выборов оказался пропорционален доле голосов в поддержку каждой из партий 1. Ту же самую сетку можно разметить, используя комбинацию концентрации и размазывания, чтобы добиться экстремальных результатов 2, 3, — в первом случае партия синих побеждает во всех округах, во втором она одерживает победу лишь в четырех из десяти. В данном конкретном случае геометрия разрезания оказывается в пользу партии синих. Статистический анализ с использованием метода Монте-Карло по схеме марковской цепи показывает, что в пространстве возможных вариантов разбиений партия оранжевых, вероятнее всего, получит два или три места, а не свою пропорциональную долю, равную четырем.

обеспечивать физическую досягаемость. В федеральном законе 1901 г. о пропорциональном распределении ассигнований впервые в законодательной практике США было отмечено робкое пожелание, чтобы избирательные округа представляли собой «компактные территории». Слово «компактный» с тех пор прошло красной нитью через весь правовой ландшафт относительно пересмотра границ избирательных округов, но почти всегда без четкого определения.

Например, во время совещания 2017 г. Национальной конференции законодательных собраний штатов я узнала, что после последней переписи законодатели штата Юта предприняли достойные похвалы усилия и нашли время, чтобы создать сайт «Пересмотр избирательных округов в штате Юта» (*Redistrict Utah*) с целью принимать предложения рядовых граждан по вопросу изменения карты избирательных округов. Чтобы участвовать в рассмотрении, карты должны были быть «достаточно компактными». Я ухватилась за возможность выяснить, как именно эта характеристика

Размер сетки; количество округов	Округа равного размера	Размеры округов могут отличаться (+/-1)
2 x 2; два округа	2	6
3 x 3; три округа	10	58
4 x 4; два округа	70	206
4 x 4; четыре округа	117	1953
4 x 4; восемь округов	36	34 524
5 x 5; пять округов	4 006	193 152
6 x 6; два округа	80 518	?*
6 x 6; три округа	264 500	?
6 x 6; четыре округа	442 791	?
6 x 6; шесть округов	451 206	?
6 x 6; девять округов	128 939	?
6 x 6; 12 округов	80 092	?
6 x 6; 18 округов	6728	?
7 x 7; семь округов	158 753 814	?
8 x 8; восемь округов	187 497 290 034	?
9 x 9; девять округов	706 152 947 468 301	?

Как сравнить бесчисленные варианты нарезки избирательных округов

Цепи Маркова — это случайные блуждания по графу или сетке, в которых каждое следующее положение определяется законами вероятности и зависит от его текущего местоположения. В методах Монте-Карло для оценки распределения вероятности используются случайные выборки. Объединение обоих методов, получившее название «метод Монте-Карло по схеме марковской цепи» (МКМЦ), — это мощный инструмент для поиска возможных вариантов нарезки избирательных округов в штате. Использовать методы численного анализа с целью выявить нечестную нарезку округов пытаются уже несколько десятилетий, однако попытки применить для решения этой задачи МКМЦ начались гораздо позже.

Простой случай

Легко пронумеровать все способы разрезания простой сетки на округа одинакового размера. Для сетки два на два с округами равного размера существует лишь два решения. Однако если у округов могут быть разные размеры, число возможных решений сразу же увеличивается до шести.

Округа равного размера

Два решения



Размеры округов могут отличаться на +/- 1

Шесть решений



*Математики еще не пронумеровали эти решения, эта задача может потребовать недели вычислений на компьютере или даже более. Подробнее на сайте www.mggg.org

оценивается и обретает законную силу, но узнала лишь, что это было сделано попросту путем отбрасывания нелепо выглядящих карт округов. И каким бы плохим ни был этот подход, Юта отнюдь не одинока. В законодательстве 37 штатов на этот счет прописаны определенные инструкции, но почти в каждом случае все решается на глазок.

Проблема в том, что внешние очертания избирательного округа создают лишь частичное и зачастую обманчивое представление о нем. С одной стороны, могут существовать вполне здравые причины для уродливой формы. Физическая география или разумные попытки следовать границам административного округа или объединить группы населения по интересам могут повлиять на проведение границы, хотя столь же часто приоритеты законодательства вроде тех, что перечислены, просто приносятся в жертву в попытке защитить избирательные округа, скомпонованные с самым большим количеством правонарушений. С другой стороны, округлой формы, компактные и симметричные избирательные округа не гарантируют полноценного сертификата качества. Как раз в этом году в Пенсильвании план перекройки избирательных округов по выборам в конгресс, предложенный республиканской партией в законодательном собрании штата, получил высокие оценки за компактность по всем пяти параметрам, установленным Верховным судом Пенсильвании.

Однако математический анализ показал, что этому плану присущ тот же самый чрезмерный партийный уклон, что был и у «перекрученного», принятого в 2011 г., который тот должен был заменить. Поэтому законодатели предпочли пойти на крайние меры, приняв план независимых сторонних экспертов.

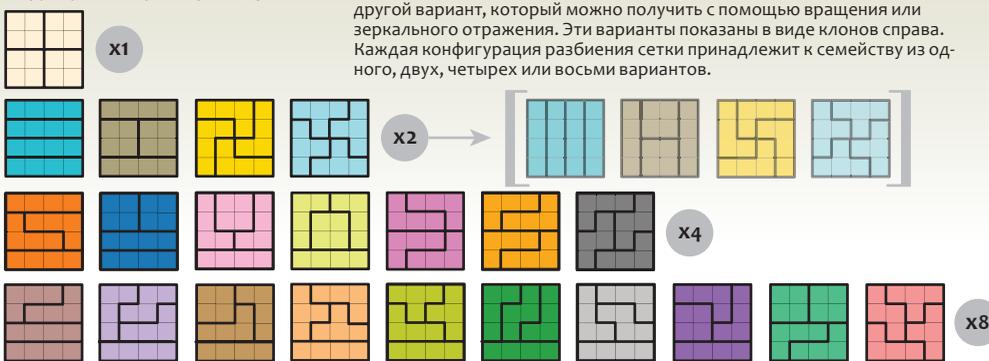
Неудовлетворительные итоги

Но если форма не может служить надежным индикатором джерримендеринга, как насчет того, чтобы исследовать степень соответствия избранных представителей картине голосования электората? Безусловно, неудовлетворительные результаты на первый взгляд дают доказательства злоупотребления. Но не спешите с выводами. Взять республиканцев в моем родном штате Массачусетс. В ходе 13 федеральных выборов президента и выборов в сенат, прошедших с 2000 г., кандидаты-республиканцы в среднем по штату набирали более трети голосов — то есть в шесть раз превысили уровень, необходимый для того, чтобы получить место в одном из девяти избирательных округов Массачусетса, поскольку в избирательной компании, в которой только два кандидата имеют шанс одержать победу, для этого требуется лишь простое большинство. Однако ни один из кандидатов-республиканцев не получал место в палате представителей с 1994 г.

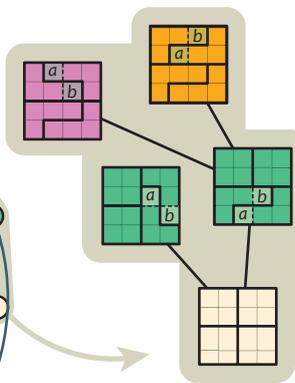
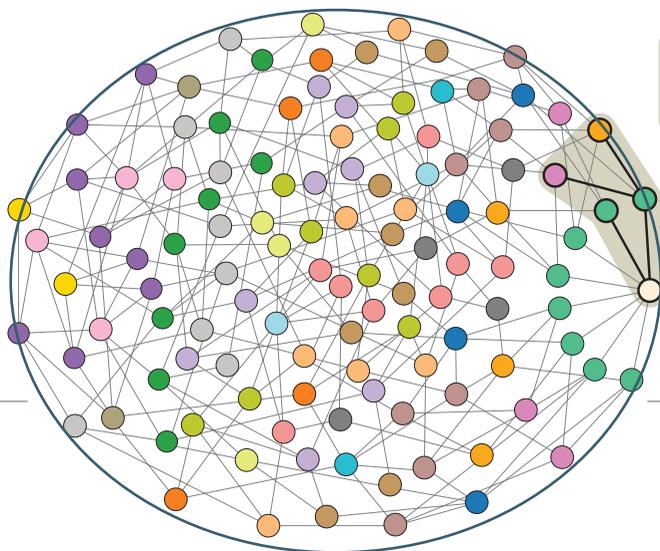
Случай с большей сеткой

По мере роста размеров сетки число возможных вариантов ее разрезания резко увеличивается. Деление сетки четыре на четыре на четыре округа равного размера имеет 117 решений. Если округа могут отличаться размерами на одну клетку, решений будет уже 1953. В недалеком будущем для нумерации возможных вариантов более сложных сеток нам придется привлечь самые мощные компьютеры. Это представляет собой проблему для любого, кто попытается выявить злостные махинации в карте избирательных округов, перебирая несметное число способов нарезки одного из штатов США. И здесь на помощь приходит метод МКМЦ.

Округа равного размера: **117 решений**



«x2» — означает, что каждая из конфигураций содержит ровно один другой вариант, который можно получить с помощью вращения или зеркального отражения. Эти варианты показаны в виде клонов справа. Каждая конфигурация разбиения сетки принадлежит к семейству из одного, двух, четырех или восьми вариантов.



Исследовать планы разбиения на избирательные округа можно, идя случайным образом по метаграфу, определяемому пошаговыми переворачиваниями блока ячеек. На вкладке для каждой модели разбиения отмечены ячейки *a* и *b*, принадлежность которых к тому или иному округу меняется при очередном шаге, в итоге переходя в конфигурацию, показанную на рисунке. Линии в этом графе изображают элементарные шаги по изменению принадлежности ячеек. Геометры пытаются понять форму и структуру метаграфа, дающего модель пространства всех возможных планов по разбиению на округа и служащего примером многих миллиардов планов.

Должно быть, мы имеем дело с джерримендерингом, препятствующим получению республиканцами законной победы в ряде округов, верно? Вот только математика в данном случае никакого криминала не усматривает. Давайте взглянем на выборную гонку в штате в целом и оставим в стороне беспорных лидеров и другие ведущие в тупик переменные. Возьмем, например, Кеннета Чейза (Kenneth Chase), соперника Теда Кеннеди (Ted Kennedy) от республиканской партии на выборах в сенат 2006 г., который набрал 30% голосов в целом по штату. При пропорциональной системе следовало бы ожидать, что Чейз побьет Кеннеди почти в трех из девяти избирательных округах. Однако числа и не шелохнулись. Оказывается, математически невозможно выделить одну территорию размером с избирательный округ, включающий города или их окрестности, даже разбросанные по всему штату, в которой победил бы Чейз. Поддерживающие его избиратели просто не объединяются в достаточно плотные группы. Вместо этого на большинстве территорий за Чейза проголосовали на уровне, близком к среднему по штату, и поэтому было слишком мало избирательных

«строительных блоков», поддерживающих Чейза, которые можно было бы объединить в единое «здание».

Любому меньшинству избирателей требуется определенный уровень неоднородности в распределении его голосов, чтобы наша избирательная система давала возможность хотя бы теоретически обеспечить ему представительство. И в том типе анализа, который применялся к рассмотрению соперничества Чейза и Кеннеди, даже не учитывались пространственные факторы, такие как стандартные требования, чтобы каждый избирательный округ был единым пространством или, как говорят математики, связной областью. Правоммерно задаться вопросом, каким образом мы когда-либо сможем заставить архитекторов избирательных округов отчитываться, если ландшафт возможностей может таить так много сурпризов.

Блуждая, идем к решению проблемы

Единственный разумный путь добиться честности при составлении планов границ избирательных округов — это сравнить их с другими реальными планами нарезки одной и той же подведомственной области, поскольку нужно контролировать все аспекты исходов выборов, которые связаны с законодательством штата, его демографией и географией. Проблема в том, что изучение пространства

SOURCE: ZACHARY J. SCHUTZMAN AND FLOOR VAN DE VELDE

возможных вариантов нарезки избирательных округов становится огромной, практически нерешаемой задачей.

Рассмотрим простую сетку четыре на четыре и предположим, что мы хотим разделить ее на четыре округа одинакового размера, состоящих из четырех смежных квадратиков каждый. Если представить себе, что эта сетка — часть шахматной доски, и смежное расположение мы интерпретируем как возможность для ладьи пройти в любую точку округа, то для этого существует ровно 117 способов. Если считать смежными квадратиками, соприкасающиеся в одной (угловой) точке (так называемое ферзевое прилегание), то таких способов будет 2620. И их не так-то просто сосчитать. Как выразился мой коллега Джим Пропп (Jim Propp), профессор Массачусетского университета в Лоуэлле и ведущий специалист в области перечислительной комбинаторики: «В одном измерении, чтобы разделять и властвовать, достаточно разорвать траекторию в одной из точек маршрута, а в двух измерениях вдруг оказывается, что существует множество способов попасть из точки A в точку B».

Проблема в том, что наилучшие алгоритмы подсчета основаны на рекурсии (то есть для решения задачи используется аналогичная задача, на шаг более простая), однако к задачам двумерного пространственного подсчета рекурсия плохо применима без использования определенной внешней структуры. Поэтому полное перечисление должно основываться на грубой силе. И если компьютер с хорошо написанной программой может решить задачу по классификации разбиений небольших сеток почти мгновенно, то с ростом размеров сетки мы наблюдаем огромный скачок в увеличении сложности — и вычислительная сложность быстро разрастается за пределы досягаемости. К тому времени, когда вы подойдете к сетке девять на девять, будет уже 700 трлн решений для равномошных ладейных разбиений и даже высокопроизводительному компьютеру потребуется неделя, чтобы подсчитать их все. Это выглядит как безнадежное дело. Мы пытаемся оценить один из возможных способов разрезания, не имея возможности пересчитать — не говоря уже о том, чтобы каким-то образом сравнить — все пространство альтернативных вариантов. Это все равно что идти на ощупь по бесконечной темной глухой тайге.

Хорошая же новость заключается в том, что существует стандартная процедура, используемая в научных исследованиях для решения именно таких неподъемных задач: методы Монте-Карло по схеме марковской цепи (МКМЦ). Цепи Маркова — это методы случайного блуждания, когда точка, куда вы попадете в результате следующего шага, управляется случаем и зависит только от того, где вы находитесь в настоящий момент

(в каждой точке, чтобы выбрать, в какую из соседних точек пойти, вы бросаете кости). Методы Монте-Карло — это всего лишь инструмент для оценки с помощью случайной выборки. Объедините их вместе — и вы получите мощный инструмент для поиска в огромном пространстве возможных исходов. Метод МКМЦ успешно применялся для расшифровки тюремной переписки, изучения свойств жидкостей и фазовых переходов в них, нахождения доказуемо точного быстрого приближения для трудных вычислительных задач и многого другого. По оценке выдающегося ученого в области математической статистики Перси Дякониса (Persi Diaconis), опубликованной в его обзоре 2009 г., методом МКМЦ решается от 10 до 15% статистических задач в науке, технике и бизнесе, и с тех пор число решаемых с его помощью задач только выросло. Хотя проведение расчетов по перекройке округов уже имеет историю в несколько десятилетий, серьезные попытки применить метод МКМЦ для этой цели начали появляться лишь где-то в 2014 г.

Представьте, что официальные лица условной страны Гридландии подрядили вас, чтобы разобраться, насколько обоснована схема разбиения на избирательные округа, предложенная законодательной властью этой страны. Если Гридландия представляет собой сетку квадратов размером четыре на четыре и если по ее конституции требуется ладейная смежность округов, то вам повезло: существует ровно 117 способов составить отвечающий требованиям план, и вы можете проверить их все. Вы можете построить абсолютно точную модель этого пространства планов разбиения на избирательные округа, используя 117 узлов, чтобы представить подходящие варианты и, добавляя границы между узлами, изобразить простые ходы, при которых два квадрата в этой сетке меняют свои избирательные предпочтения. Эти границы дают вам способ концептуализации того, насколько один вариант похож на другой, путем простого подсчета числа шагов, необходимых для превращения одного во второй. (Я называю такую структуру метаграфом, потому что данный граф показывает способы, как разрезать на части другой граф.) Теперь предположим, что в законодательном собрании штата большинство имеет партия бубен, а ее соперники подозревают, что она мошенничает с выборами в парламенте в свою пользу. Чтобы определить, действительно ли это так, можно обратиться к данным выборов. Если вариант бубен дал для этой партии больше мест на последних выборах, скажем, 114 из 117 альтернативных вариантов, и если это верно для нескольких последних выборов, этот вариант — безусловный статистический выброс. Это убедительное свидетельство партийного джерримендеринга, и вам не потребуются методы МКМЦ для такого анализа.

Метод Монте-Карло по схеме марковской цепи выходит на сцену, когда у вас полномасштабная проблема, а не эта детская игрушечная задачка. Как только вы пройдете 100 или около того узлов, появится аналогичный метаграф, но вы не сможете выстроить его полностью из-за его пугающей сложности. Это, однако, не означает конец игры. Из любого одного проекта разбиения нетрудно выстроить локальные соседние округа, проделав все возможные шаги. Теперь вы можете проделать миллион, миллиард или триллион шагов и получить то, что вам надо. Существует математическое обоснование (эргодическая теория, если точнее), которое гарантирует, что если вы идете случайным образом достаточно долго, то ансамбль карт, которые вы собрали, будет обладать свойствами всей Вселенной, обычно задолго до того, как вы посетите даже скромную часть узлов в пространстве вашего штата. Это позволяет вам определить, действительно ли карта, которую вы оцениваете, безбожно обманывает в соответствии с той или иной партийной метрикой.

Передний край научных поисков — задача построить еще более мощные алгоритмы и одновременно сформулировать новые теоремы, которые подтвердят, что наша выборка достаточно репрезентативна, чтобы на ее основе сделать твердые выводы. Этот метод получает все большую поддержку среди ученых, но имеется также и много других направлений дальнейшего развития исследований.

Покойся с миром, губернатор Герри

До сих пор суды, похоже, относятся с улыбкой к такому подходу. Два математика, Джонатан Мэттингли (Jonathan Mattingly) из Дюкского университета и Уэс Пегден (Wes Pegden) из Университета Карнеги — Меллона, недавно свидетельствовали перед судом на основе данных, полученных методом Монте-Карло по схеме марковской цепи, в федеральном суде в Северной Каролине и суде уровня штата в Пенсильвании соответственно.

Мэттингли использовал метод МКМЦ, чтобы охарактеризовать разумный диапазон, который можно было бы наблюдать для различных метрик, таких как полученные на выборах места в парламенте, для различных ансамблей наборов нарезок избирательных округов. Его метод случайных блужданий был взят за основу для оценки планов, которые казались почти идеальными и полностью соответствовали законодательству штата Северная Каролина. Используя свои ансамбли, он доказал, что утвержденный план представляет собой модель, значительно отклоняющуюся от наиболее вероятного состояния в пользу одной из партий. Пегден использовал другой вид проверки, базирующийся на теореме, точно определяющей, насколько невероятно то, что нейтральный план

даст результат намного хуже, чем другие, которые уже были рассмотрены путем случайных блужданий. В его методе рассчитываются p -значения, которые налагают ограничения на то, насколько вероятно найти аномальное смещение случайным образом. Судьи нашли оба аргумента заслуживающими доверия и опирались на них каждый в своем решении.

Что касается меня, в начале этого года губернатор Пенсильвании Том Вольф привлек меня в качестве эксперта-консультанта в распределении связанной с прорисовыванием новых границ избирательных округов штата, последовавшей за решением Верховного суда коренным образом пересмотреть план демократов 2011 г. Мой вклад состоял в предложении использовать рамки метода Монте-Карло по схеме марковской цепи для оценки новых планов, по мере их поступления, воспользовавшись мощностью метода отбрасывания на основе анализа выбросов и в то же время добавляя новые способы, чтобы учесть в этой игре больше различных принципов построения избирательных округов, от компактности к делению округов и далее к учету демографической структуры населения. Проведенный мною анализ пришел к таким же выводам, что и анализ Пегдена, показав, что план 2011 г. был крайним случаем выброса в пользу одной из партий, — при этом я обнаружила, что и новый план, поддерживаемый законодателями, так же аномален, как и старый, хотя его улучшенный внешний вид вводил в заблуждение.

По мере того как приближается перепись населения 2020 г., страна готовится к очередному взрыву дикой перекройки избирательных округов с непрекращающимися последующими судебными тяжбами. Я надеюсь, что следующие шаги завершатся не просто в залах судебных заседаний, но также и в реформах, которые потребуют, чтобы большой ансамбль карт, сделанных с помощью инструментов с открытыми исходными кодами, был проверен прежде, чем какой-либо из планов станет законом. Таким образом законодательная власть сохранит свои традиционные прерогативы одобрять и утверждать границы избирательных округов, но ей следует также дать определенные гарантии, что она не положит свой слишком толстый палец на одну из чаш весов правосудия.

Компьютерные расчеты никогда не станут для нас причиной жестких решений по пересмотру границ избирательных округов и не смогут дать единственное оптимальное решение задачи их планирования. Но они могут удостоверить, что план составлен в строгом соответствии с законами штата. Только это сможет обуздать ситуацию в условиях вопиющих злоупотреблений и запустит процесс восстановления доверия к правовой системе. ■

Перевод: А.П. Кузнецов



СПЕЦИАЛЬНЫЙ РЕПОРТАЖ

НАУКА О НЕРАВЕНСТВЕ

Высокий уровень экономического неравенства негативно сказывается на благосостоянии и здоровье людей, а также на биосфере. Вопреки ожиданиям, неравенство затрагивает богатых и средний класс, а не только бедных. Экономист Джозеф Стиглиц раскрывает причины неравенства в США и предлагает меры по его устранению. Политолог Вирджиния Юбэнкс рассказывает, как цифровые системы вместо помощи часто причиняют вред самым уязвимым членам общества. Нейробиолог Роберт Сапольски подробно объясняет, за счет каких механизмов неравенство оказывает влияние на психическое и физическое здоровье. Экономист Джеймс Бойс описывает, как несбалансированность сил в экономике и политике наносит ущерб окружающей среде и как сообщества объединяются, чтобы с этим бороться.

СОДЕРЖАНИЕ

НЕЧЕСТНАЯ ЭКОНОМИКА

Экономическое неравенство в Соединенных Штатах выше, чем в других развитых странах. **Американская политическая система** наряду с изначально существовавшим высоким уровнем неравенства предоставила богатым политическое влияние, достаточное, чтобы менять законы в свою пользу, что привело к еще большему неравенству. **Для того чтобы уменьшить неравенство** и возродить надежды, необходимо разорвать этот замкнутый круг, ограничив власть денег в политике.

АВТОМАТИЗАЦИЯ НЕОБЪЕКТИВНОСТИ

Политики и программные администраторы все чаще используют алгоритмы, чтобы определять, подходят ли бедные люди для включения в государственные программы помощи. **Однако без учета более серьезных проблем**, связанных с предвзятостью системы и ошибочной политикой, автоматизация только укрепляет неравенство.

ЗДОРОВЬЕ И РАЗРЫВ В УРОВНЕ БЛАГОСОСТОЯНИЯ

Неравенство приводит к ухудшению здоровья и ранней смертности, но не только из-за плохого питания и слабой доступности медицинских услуг. **Увеличение разрыва** между богатыми и бедными, как показали недавние исследования, способствует повышению нагрузки на организм за счет хронического стресса. **Такой психосоциальный стресс** действует на организм по трем направлениям: он вызывает постоянный воспалительный процесс, разрушение хромосомных элементов и повреждение областей мозга.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЦЕНА НЕРАВЕНСТВА

Бедные люди больше, чем другие, страдают от ухудшения состояния окружающей среды. **Большой разрыв** между обладающими экономической и политической властью и теми, кто этого лишен, приводит к обострению экологической обстановки на местах. **Новый энвайронментализм** помогает защищать маргинализированные группы населения от вреда, наносимого теми, кто получает выгоду от разрушения окружающей среды.







НЕЧЕСТНАЯ ЭКОНОМИКА

И что нам с этим делать

Джозеф Стиглиц

Американцы привыкли считать свое государство особенным. Во многом это так и есть: в США, несомненно, больше всего лауреатов Нобелевской премии, самые крупные расходы на оборону (они почти равны суммарному оборонному бюджету следующих десяти стран в списке) и больше всего миллиардеров (в два раза больше, чем у ближайшего соперника — Китая). Но некоторые примеры американской исключительности не дают поводов для гордости. Согласно большинству оценок, в Соединенных Штатах самый высокий уровень экономического неравенства среди развитых стран. При самых высоких затратах на здравоохранение на душу населения в мире в США все еще самая низкая средняя продолжительность жизни среди развитых стран. Америка также относится к ряду государств, печально известных самыми низкими показателями, касающимися равенства возможностей.

Неотъемлемая часть нашего существования — представление об американской мечте, то есть о том, что Америка в отличие от старушки Европы — страна возможностей. И все же цифры говорят обратное. Жизненные перспективы молодых американцев больше, чем в любой другой развитой стране, зависят от доходов и образования их родителей. Рассказы о выбившихся в люди бедняках тиражируются в СМИ именно потому, что такие случаи — редкость.

И ситуация, похоже, ухудшается, частично в результате действия факторов, которые мы неспособны контролировать, таких как развитие технологий и глобализация, но в основном, что больше всего беспокоит, из-за нас самих. К такой мрачной ситуации привели не законы природы, а законы человечества. Рынки не существуют в вакууме:

они формируются под влиянием правил и законов, которые могут разрабатываться так, чтобы дать преимущество одним группам перед другими. Президент Доналд Трамп прав, говоря, что системой манипулируют — как раз члены наследственной плутократии, к которой принадлежит он сам. И он только ухудшает ситуацию.

Америка издавна превосходила другие страны по уровню неравенства, но за последние 40 лет значение этого показателя достигло новых вершин. В то время как доля доходов находящихся на вершине шкалы 0,1% увеличилась вчетверо, а 1% — вдвое, доходы 90% бедного населения снизились. С учетом инфляции зарплаты беднейших слоев остались на том же уровне, что и 60 лет назад! Фактически доходы людей с общим или неполным средним образованием упали за последние

ОБ АВТОРЕ

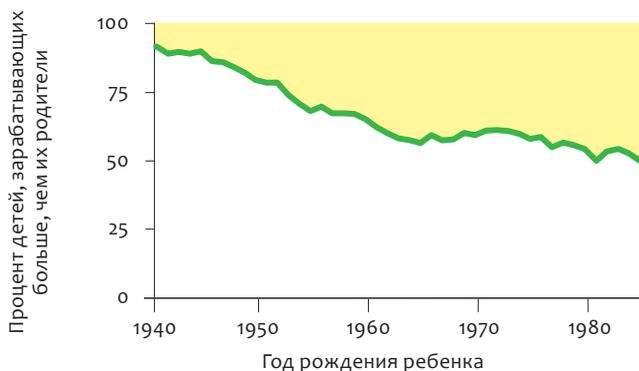


Джозеф Стиглиц (Joseph E. Stiglitz) — профессор Колумбийского университета и главный экономист в Институте Рузвельта. Лауреат Нобелевской премии по экономике 2001 г., Стиглиц возглавлял группу экономических советников при президенте США в 1995–1997 гг. (при администрации Билла Клинтона), а в 1997–2000 гг. занимал пост главного экономиста и первого вице-президента Всемирного банка. В 2008–2009 гг. Стиглиц был председателем Комиссии экспертов ООН по реформированию международной валютно-финансовой системы.

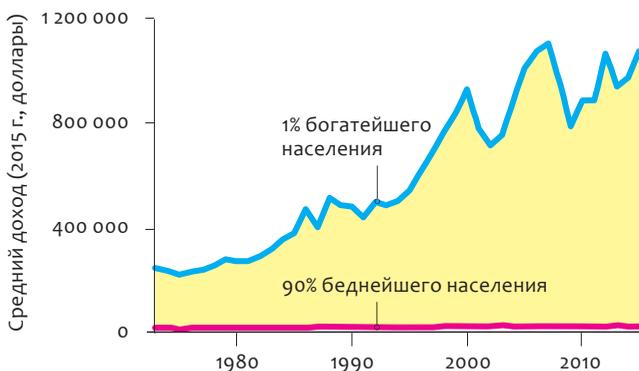
Угасающая американская мечта

Впреки распространенному представлению, равенство возможностей в США гораздо ниже, чем в большинстве развитых стран, и ситуация ухудшается. Доклад экономиста Раджа Четти (Raj Chetty) и других показывает, что американцы, родившиеся в 1940 г., почти всегда преуспевали больше, чем их родители. Однако те, кто родился в 1980 г., с той же степенью вероятности оказывались в затруднительном положении. Ситуация с равенством возможностей ухудшается в значительной степени из-за высокой стоимости высшего образования в сочетании с увеличением экономического неравенства. Статистика Всемирной базы данных о неравенстве доходов показывает, что приблизительно с 1970 г. доход богатейшего 1% с учетом инфляции увеличился вчетверо, тогда как доход беднейших 90% остался прежним. Доход мужчин со средним общим образованием упал.

Для многих американская мечта угасает...



...в то время как в США разрыв в доходах увеличивается



десятилетия. Больше всего это затрагивает мужское население, поскольку США перешли от обрабатывающей промышленности к экономике, основанной на сфере услуг.

Смерть от отчаяния

Распределение богатства еще более неравномерно: всего три американца владеют состояниями, равными по размеру имуществу 50% наименее обеспеченного населения вместе взятых. Это свидетельствует о том, как много денег сконцентрировано в верхней части социальной лестницы и как мало внизу. Семьи, относящиеся к наименее обеспеченным 50% населения, вряд ли имеют денежные накопления на крайний случай. Газеты переполнены историями о тех, для кого поломка машины или болезнь стала отправной точкой: люди попали в замкнутый круг и уже не смогли из него выбраться.

В значительной степени из-за высокого уровня неравенства (подробнее — в статье «Экономическое неравенство отражается на здоровье» Роберта Сапольски) средняя продолжительность жизни в США, и так исключительно малая, постоянно снижается. Так происходит, несмотря на чудеса медицины и значительные прорывы, достигнутые здесь, в Америке, которые быстро становятся доступны богатым людям. Экономист Энн Кейс (Ann Case) и лауреат Нобелевской премии по экономике 2015 г. Энгус Дитон (Angus Deaton) описывают одну из основных причин роста смертности — повышающееся количество страдающих алкоголизмом, увеличение числа случаев передозировок наркотиков и суицидов — как «смерть от отчаяния» тех, кто потерял надежду.

У защитников американского неравенства есть готовое объяснение. Они ссылаются на механизмы конкурентного рынка, где законы спроса и предложения определяют уровень зарплат, цен и даже процентной ставки, — механическую систему, напоминающую ту, которая описывает физический мир. Отстаивающие такую точку зрения утверждают, что те, кто обладает редкими активами или навыками, щедро вознаграждаются, поскольку они вносят больший вклад в экономику. То, сколько они получают, просто отражает,

SOURCES: "THE FADING AMERICAN DREAM: TRENDS IN ABSOLUTE INCOME MOBILITY SINCE 1940," BY RAJ CHETTY ET AL., IN SCIENCE, VOL. 356, APRIL 26, 2017 (interparent wealth comparison); WORLD INEQUALITY DATABASE (90% versus 1% wealth trend data); Graphics by Jen Christensen

сколько они вкладывают. Зачастую они получают даже меньше, чем вкладывают, поэтому остальным остается намного больше.

Такая выдумка когда-то могла смягчить вину верхушки и убедить остальных принять столь плачевное состояние вещей. Возможно, определяющим моментом для раскрытия лжи стал финансовый кризис 2008 г. Тогда банкиры, доведшие глобальную экономику до тяжелейшего состояния за счет грабительского кредитования, манипулирования рынками и других антиобщественных действий, похитили миллионы долларов в виде премий, в то время как из-за этих людей миллионы американцев потеряли работу и свои дома и еще десятки миллионов жителей планеты пострадали. Практически ни один из этих банкиров не понес ответственности за свои преступления.

Я понял, что подобное объяснение неравенства — выдумка, когда еще был школьником и размышлял о богатстве плантаторов, созданном трудом рабов. Во времена Гражданской войны рыночная стоимость рабов на Юге составляла приблизительно половину всего богатства региона, включая стоимость земли и физический капитал — фабрики и оборудование. Источником богатства, по крайней мере в этой части государства, было не производство, изобретения или торговля, а эксплуатация. Сегодня эта открытая форма эксплуатации сменилась менее явной, которая усилилась со времен «революции» Рейгана — Тэтчер 1980-х гг. Я считаю, что причина роста неравенства в Соединенных Штатах заключается именно в такой эксплуатации.

После проведения политики «Нового курса» в 1930-х гг. американское неравенство стало уменьшаться. К 1950-м гг. неравенство сократилось до такой степени, что еще один лауреат Нобелевской премии по экономике, Саймон Кузнец, сформулировал постулат, ставший известным как «закон Кузнецца». Согласно этому закону, на ранних стадиях развития, когда некоторые регионы страны пользуются вновь открывшимися возможностями, неравенство растет; на более

поздних стадиях оно сокращается. Теория долго согласовывалась с фактами, но затем, в начале 1980-х гг., тенденция полностью изменилась.

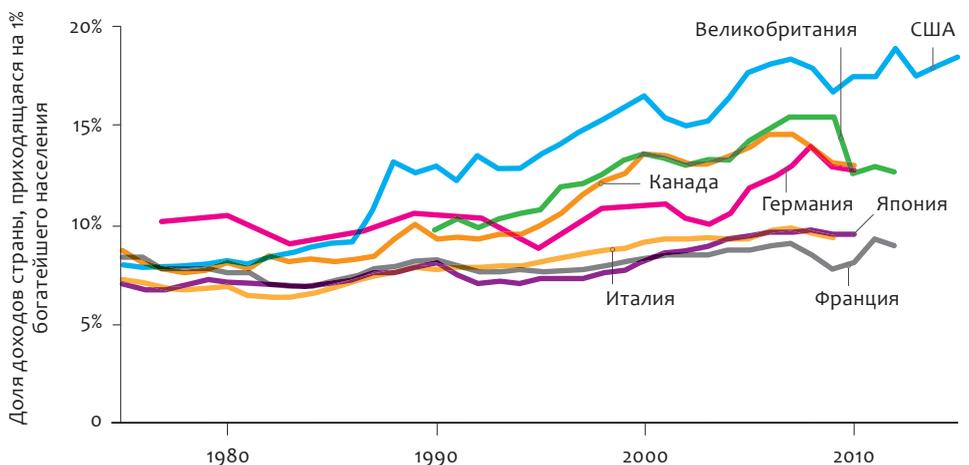
Объяснение неравенства

Экономисты выдвигают ряд объяснений, почему на самом деле неравенство усугубляется во многих развитых странах. Некоторые утверждают, что с развитием технологий повышается спрос на высококвалифицированный труд и снижается потребность в работниках с низкой квалификацией, что и приводит к снижению зарплат последних. И все же только этим нельзя объяснить, почему даже квалифицированный труд так мало оплачивается в течение последних двух десятилетий, почему так плохо обстоит дело со средней зарплатой и почему ситуация в США намного хуже, чем в других развитых странах. Изменения технологий происходят по всему миру и должны были бы влиять на все передовые экономики одинаково. Другие экономисты винят саму глобализацию, ослабляющую позиции работников. Фирмы могут работать и работать за границей до тех пор, пока не ослабнут требования о повышении зарплат. Но, опять же, глобализация — это общее явление для всех ведущих экономик. Почему ее последствия для США намного серьезней?

Отчасти в ситуации виноват переход от экономики, основанной на производстве, к экономике, основанной на сфере услуг. В своем крайнем проявлении (фирма, состоящая из одного человека)

Неравенство в мире: тенденции

Неравенство усилилось в большинстве развитых стран под влиянием таких факторов, как глобализация, изменения технологий и переход к экономике, основанной на сфере услуг. Тем не менее, по информации Всемирной базы данных о неравенстве доходов, в США этот показатель растет быстрее всего. Так происходит в связи с тем, что правила переписывались, чтобы сделать их более выгодными для богатых и невыгодными для всех остальных. Крупным компаниям разрешалось получить большее влияние на рынок, а влияние работников сокращалось. Политика в сфере налогообложения и других сферах экономики постоянно создает для богатых благоприятные условия.



SOURCES: ECONOMIC REPORT OF THE PRESIDENT, JANUARY 2017; WORLD INEQUALITY DATABASE

экономика сферы услуг — это система, действующая по принципу «Победитель получает все». Например, кинозвезды зарабатывают миллионы, а большинство актеров — жалкие гроши. Кроме того, в экономике сферы услуг, по-видимому, возможен более широкий разброс в размерах зарплаты по сравнению с экономикой производства, так что такой переход приводит к усилению неравенства. Тем не менее этот факт не объясняет, почему в течение десятилетий не увеличивался средний уровень оплаты труда. Более того, переход к экономике сферы услуг происходит в большинстве развитых стран, так почему в США все обстоит намного хуже?

Кроме того, поскольку услуги часто предоставляются локально, фирмы имеют большее влияние на рынок, то есть возможность устанавливать цены выше, чем те, что были бы в условиях конкурентного рынка. В маленьком сельском городке Америки может быть только один авторизованный сервисный центр *Toyota*, в котором вынуждены обслуживать свои машины практически все владельцы этой марки. Фирмы, предоставляющие такие локальные сервисные услуги, могут завышать цены, увеличивая свою прибыль и доходы владельцев и менеджеров. Это тоже усиливает неравенство. Но все-таки почему уровень неравенства практически уникален в США?

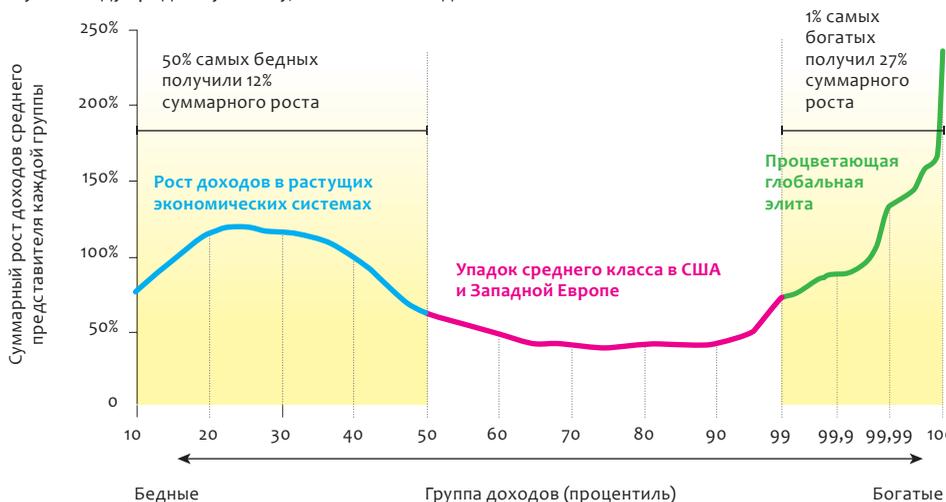
В своем знаменитом труде 2013 г. «Капитал в XXI в.» французский экономист Тома Пикетти (Thomas Piketty) обращает свое внимание на капиталистов. Он предполагает, что те немногие, кто владеет большей частью капитала страны, хранят в виде сбережений так много, что с учетом стабильной и высокой окупаемости капитала (по отношению к уровню роста экономики) их доля в национальном доходе увеличивается. Однако теория Пикетти вызывает сомнения по ряду оснований. Например, в США уровень сбережений даже самых состоятельных граждан настолько низкий по сравнению с богатыми людьми в других странах, что неравенство в Америке должно быть меньше, а не больше.

Альтернативная теория намного больше соответствует фактам. С середины 1970-х гг. как на глобальном уровне, так и на уровне государств правила игры в экономике переписывались таким образом, что богатые получали преимущество перед остальными. И в США в таком порочном изменении правил зашли еще дальше, чем в других развитых странах, — даже несмотря на то, что в Америке эти правила уже были менее благоприятны для трудящихся. С этой точки зрения рост неравенства — это вопрос выбора, то есть следствие проводимой политики, принятых законов и норм.

В Соединенных Штатах влияние крупных корпораций на рынок, которое с самого начала было серьезнее, чем в остальных развитых странах, увеличилось даже больше, чем где-либо еще. С другой стороны, влияние на рынок со стороны работников, которое и было невысоким по сравнению с большинством развитых стран, стало еще меньше. Это явление связано не только с переходом к экономике сферы услуг, но и с мошенническими правилами игры — правилами, установленными политической системой, которой манипулируют с помощью предвыборных махинаций, давления на избирателей и денег. Сформировался порочный круг: экономическое неравенство превращается

Неравномерное распределение результатов глобального роста

Глобализация положительно сказалась на миллионах бедных людей в странах с развивающейся экономикой, особенно в Китае. Данные, собранные экономистом Бранко Милановичем (Branko Milanovic) и представленные в «Докладе о неравенстве в мире — 2018» демонстрируют, тем не менее, что в период с 1980 по 2016 г. чрезмерную выгоду извлекал 1% самых богатых людей в мире, которые получили более 25% растущих доходов глобальной экономики. В начале 2018 г. *Oxfam International* сообщили, что всего 42 человека владеют состояниями, равными имуществу вместе взятых 50% самых бедных. В США и Западной Европе рост глобальной экономики принес наименьшую выгоду среднему классу, так же как и беднейшим слоям населения.



в политическое, в результате создаются правила, дающие преимущество богатым, и в итоге экономическое неравенство усиливается.

Петля обратной связи

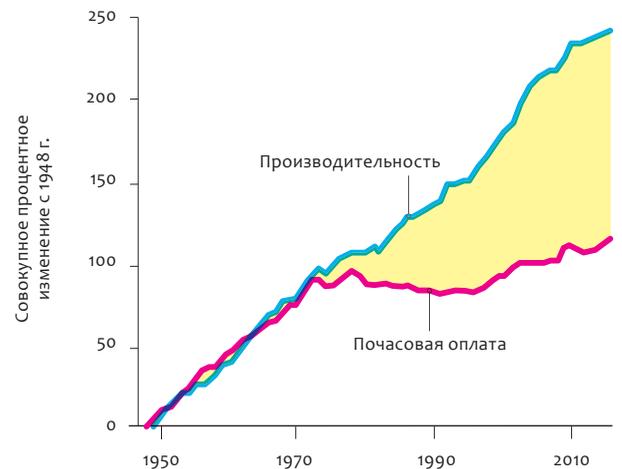
Политологи установили механизмы влияния денег на политику в определенных политических системах, в результате которого более высокий уровень экономического неравенства превращается в большее политическое неравенство. Неравенство в политике, в свою очередь, приводит к еще большему экономическому неравенству, так как богатые используют политическую власть для установления выгодных для себя правил игры, например для смягчения антимонопольных законов и ослабления влияния профсоюзов. С использованием математических моделей экономисты, подобные мне, показали, что такая петля обратной связи «деньги — регулирование» приводит по меньшей мере к двум стабильным состояниям. Если экономика с самого начала формируется в условиях с низким уровнем неравенства, политическая система вырабатывает правила, поддерживающие этот уровень, что приводит к одному состоянию равновесия. Американская система представляет собой другое состояние равновесия и таковой и останется, пока не наступит демократическое политическое пробуждение.

Рассказ о том, как устанавливаются правила, необходимо начать с антимонопольных законов, первый из которых был принят в США 128 лет назад для предотвращения концентрации рыночной власти. Эти нормативные акты уже не так строго выполняются — и это в то время, когда, наоборот, власть закона должна укрепляться. Изменения технологий привели к тому, что рыночная власть сконцентрировалась в руках нескольких глобальных игроков, отчасти благодаря так называемым сетевым эффектам: вы, скорее всего, присоединитесь к конкретной социальной сети или будете использовать определенный текстовый процессор, если ими уже пользуются все ваши знакомые. Закрепившиеся на рынке компании, такие как *Facebook* или *Microsoft*, трудно вытеснить. Более того, постоянные издержки, например на разработку компонента программного обеспечения, увеличились по сравнению с предельными издержками — затратами на копирование программного продукта. Новый участник должен сначала понести эти постоянные издержки, и если он попадет на рынок, богатая крупная компания может ответить резким снижением цен. Затраты на создание дополнительного экземпляра электронной книги или программы редактирования фотоснимков, по существу, равны нулю.

Словом, выход на рынок — трудный и рискованный процесс, и это дает закрепившимся фирмам с серьезными финансовыми резервами огромную

Растущий разрыв в зарплатах

По данным Джоша Бивенса (Josh Bivens) и его коллег из Института экономической политики, приблизительно с 1980 г. производительность американских рабочих удвоилась. Но зарплаты занятых на производстве рабочих не меняются, а практически всю прибыль от увеличения производительности получают инвесторы и собственники. Тем не менее оплата труда 1% самых богатых, включая руководителей корпораций и специалистов по финансам, выросла — более чем на 150% в период с 1979 по 2012 г. Увеличивающийся разрыв в зарплатах играет важную роль в росте неравенства.



власть для уничтожения конкурентов и, в конечном итоге, повышения цен. Ситуацию усугубляет то, что в США компании отличаются изобретательностью не только относительно производимых продуктов, но и в вопросе разработки способов расширения и усиления своей рыночной власти. Еврокомиссия оштрафовала *Microsoft* и *Google* на миллиарды долларов и обязала эти компании положить конец направленным против конкуренции практикам (так, *Google* дает преимущество собственному сервису сравнения цен в интернет-магазинах). В США делается слишком мало, чтобы контролировать концентрацию рыночной власти, поэтому неудивительно, что она увеличилась во многих секторах экономики.

Манипуляция правилами также объясняет, почему эффект от глобализации оказался в Соединенных Штатах более серьезным. Согласованная атака на профсоюзы привела к сокращению почти наполовину доли рабочих — членов профсоюзов — до 11%. (В Скандинавии этот показатель составляет почти 70%.) В результате ослабления влияния профсоюзов рабочие менее защищены от попыток компаний понизить зарплаты или ухудшить условия труда. Более того, инвестиционные соглашения США, такие как Североамериканское соглашение о свободной торговле, которые преподносятся как

способ предотвращения дискриминации американских фирм, также защищают инвесторов от более строгого законодательства в области экологии и здравоохранения, действующего в других странах. Например, такие соглашения позволяют корпорациям в обход законов, защищающих граждан и окружающую среду, но влияющих на прибыль мультинациональной компании, предъявлять государствам иски для рассмотрения в закрытых международных арбитражных комиссиях. Фирмам нравятся такие условия, придающие достоверность угрозам компании переехать за рубеж в том случае, если работники не умят свои требования. Иначе говоря, подобные инвестиционные соглашения еще больше ослабляют позицию американских рабочих в переговорах с работодателями.

Люди, живущие в обществе с высоким уровнем неравенства, как правило, не имеют равных возможностей: выходцы из бедных слоев населения никогда не смогут получить образование, позволяющее им реализовать свой потенциал

Свободные финансы

Множество других изменений в законодательстве внесли вклад в усиление неравенства. Слабые законы о корпоративном управлении позволили главам американских компаний платить самим себе в 361 раз больше, чем среднему рабочему, намного больше, чем в других развитых странах. Финансовая либерализация — отказ от норм регулирования, призванных предотвратить серьезный ущерб, который могут нанести остальному обществу проблемы в финансовом секторе, такие как экономический кризис 2008 г., — предоставила финансовой индустрии возможность для увеличения масштабов и доходности и увеличила ее потенциал для эксплуатации остальных. Например, банки устанавливают ростовщические ставки процентов для заемщиков или чрезмерный размер комиссии за операции с кредитными и дебетовыми картами для торговцев, а также выпускают ценные бумаги, которые обречены на провал. Подобные методы работы, которые обычно позволяют себе банки, разрешены законом, но так не должно быть. Кроме того, часто используются и незаконные методы, в том числе манипулирование

рынком и инсайдерская торговля. В итоге финансовый сектор забирает деньги у обычных американцев в пользу богатых банкиров и акционеров банков. Такое перераспределение богатства играет важную роль в росте неравенства в Америке.

Имеются множество других способов так называемого извлечения ренты — несопоставимого с общественным вкладом вывода средств из национального дохода. Например, правовая норма, принятая в 2003 г., установила запрет на участие правительства в переговорах о ценах на лекарства по программе *Medicare* — подарок фармацевтической промышленности в размере около \$50 млрд ежегодно. Особые льготы тоже равносильны извлечению ренты: например, добывающей промышленности получение общенациональных ресурсов, таких как нефть, обходится гораздо ниже реальной рыночной стоимости, или банки получают финансирование из Федеральной резервной системы почти по нулевой ставке процента (и повторно ссужают деньги под высокие проценты). Ситуацию с неравенством еще больше усугубляет льготный режим налогообложения для богатых. В США налоги верхушки составляют меньшую долю от их доходов по сравнению с теми, кто намного беднее, — своего рода щедрость, которая еще больше проявилась с принятием администрацией Трампа налогового закона 2017 г.

Некоторые экономисты утверждают, что неравенство можно уменьшить, только отказавшись от роста и повышения эффективности экономики. Однако недавние исследования, такие как работы Джонатана Остри (Jonathan Ostry) и других специалистов из Международного валютного фонда, показывают, что экономические системы с большим уровнем равенства более эффективны, для них характерны более высокие показатели роста и уровня жизни и большая стабильность. Крайняя степень неравенства, наблюдаемая в США, и существующий образ действий фактически наносят вред экономике. Например, использование рыночной власти и ряд других охарактеризованных мною перекосов делают рынки менее эффективными, приводят к недопроизводству ценных товаров и услуг, таких как фундаментальные исследования, и перепроизводству других, таких как эксплуататорские финансовые продукты.

Более того, поскольку богатые люди тратят меньшую часть своих доходов на потребление по сравнению с бедными, общий, или совокупный, спрос в странах с большим уровнем неравенства меньше. Залатать дыру можно было бы за счет увеличения государственных расходов, например на инфраструктуру, образование, здравоохранение, то есть на те отрасли, инвестиции в которые необходимы для долговременного роста. Но обычно в обществе с высоким уровнем неравенства основным рычагом становится кредитно-денежная

политика: для стимулирования расходования средств понижаются ставки процента. Искусственное занижение ставки процента, особенно в сочетании с недостаточным регулированием финансового рынка, часто ведет к появлению экономических пузырей, что и произошло во время жилищного кризиса 2008 г.

Неудивительно, что люди, живущие в обществе с высоким уровнем неравенства, как правило, не имеют равных возможностей: выходцы из бедных слоев населения никогда не смогут получить образование, которое позволило бы им реализовать свой потенциал. Такая ситуация, в свою очередь, приводит к увеличению уровня неравенства и потере самого ценного ресурса страны — самих американцев.

Восстановление справедливости

В обществе с высоким уровнем неравенства снижается моральный дух, особенно когда неравенство рассматривается как несправедливость, а ощущение, что вас используют или обманывают, приводит к снижению производительности труда. Когда управляющие казино или банкиры, страдающие нравственной распущенностью, зарабатывают в миллионы раз больше, чем ученые, раскрывающие тайну ДНК, и изобретатели, подарившие миру лазеры и транзисторы, становится ясно: что-то не так. К тому же дети богатых начинают рассматривать себя как особый класс, обладающий правом на свою удачу, и, соответственно, более склонны нарушать правила, необходимые для функционирования общества. Все вышеперечисленное приводит к подрыву доверия и влияет на сплоченность общества и экономические показатели.

Не существует магического средства для решения такой глубоко укоренившейся проблемы, как американское неравенство. Поскольку его основные причины связаны с политикой, трудно представить значительные изменения без согласованных усилий по устранению влияния денег на политику — за счет, например, реформы финансирования избирательных кампаний. Необходимо также заблокировать механизм «вращающихся дверей», когда регуляторы и другие правительственные чиновники приходят на госслужбу из тех отраслей, в отношении которых они потом осуществляют регулирование, и опять возвращаются в те же отрасли.

Помимо этого, надо усовершенствовать прогрессивное налогообложение и обеспечить высококачественное образование, финансируемое государством, в том числе возможность поступления в университет для всех, без необходимости брать разорительный кредит. Нам нужны современные законы о конкуренции, чтобы справиться с проблемами XXI в., связанными с распределением

рыночной власти, и строгое соблюдение уже существующих законов. Необходимо трудовое законодательство, защищающее рабочих и их право объединяться в профсоюзы. Нужны законы о корпоративном управлении, ограничивающие непомерные зарплаты глав корпораций, и более строгое регулирование в сфере финансов, предотвращающее использование банками эксплуатационных практик, ставших их отличительной чертой. Необходимо обеспечить четкое соблюдение законов против дискриминации: совершенно недопустимо, что женщинам и представителям национальных меньшинств платят крохи по сравнению с тем, что получают за аналогичный труд белые мужчины. Нам нужны также более разумные законы о наследстве, которые сведут к минимуму передачу преимуществ и неблагоприятных условий из поколения в поколение.

Основные привилегии среднего класса, в том числе обеспеченная старость, больше недостижимы для большинства американцев. Необходимо гарантировать доступ к медицинскому обслуживанию, укреплять и реформировать пенсионные программы. В существующих программах вся тяжесть управления рисками возложена на работников, от которых ожидают, что они будут управлять своими пенсионными накоплениями, одновременно защищая их от рисков, связанных с инфляцией и рыночными коллапсами. При этом финансовому сектору предоставляется возможность для эксплуатации людей: им продают финансовые продукты, предназначенные не столько для обеспечения пенсии, сколько для максимизации прибыли банков. Нашей ахиллесовой пятой была ипотечная система, и по-настоящему ситуация еще не исправлена. При таком большом числе американцев, живущих в крупных городах, нам необходимо проводить городскую жилищную политику, гарантирующую доступное жилье для всех.

Это объемная программа — но выполняемая. Когда скептики говорят, что это прекрасно, но недоступно, я отвечаю, что мы не можем себе позволить не осуществлять эти мероприятия. Мы уже платим высокую цену за неравенство, но это лишь малая часть того, что нам придется заплатить, если ничего не делать, и быстро. На кону не только наша экономика, мы рискуем нашей демократией.

Чем больше наших граждан начинает понимать, почему плоды прогресса в экономике распределяются неравномерно, тем больше реальная опасность, что они будут слушать демагогов, обвиняющих в проблемах страны других и дающих фальшивые обещания очистить «мошенническую систему». Мы уже сейчас представляем, что может случиться. И все может стать намного хуже. ■

Перевод: С.М. Левензон



Illustration by Andrea Ucini



ЭКОНОМИЧЕСКОЕ НЕРАВЕНСТВО ОТРАЖАЕТСЯ НА ЗДОРОВЬЕ

Усиление неравенства между богатыми и бедными вызывает биологические повреждения тела и мозга

Роберт Сапольски

В западной культуре давно принято убеждение, что все люди созданы равными. Но в реальном мире наши возможности и ресурсы неодинаковы. Такое несоответствие подметил в 1894 г. Анатолий Франс, саркастично написав, что «закон, воплощая в себе величественную идею равноправия, запрещает спать под мостом и красть хлеб одинаково всем людям — богатым так же, как и бедным». Экономическое неравенство в последние десятилетия усиливается, особенно в США. В 1976 г. 1% самых богатых американцев владели 9% богатств страны; сейчас они имеют около 24%. Подобная тенденция наблюдается во всем мире.

Одно из последствий усиления бедности — ухудшение здоровья, и причины этого не столь понятны. Да, низкий социально-экономический статус (СЭС) означает меньшую доступность медицинских услуг и проживание в менее благоприятных для здоровья районах. И чем больше людей оказывается на нижних ступенях СЭС, тем сильнее возрастает число индивидов с медицинскими проблемами. Это не просто плохое здоровье у бедных и хорошее у всех остальных. Каждый шаг вниз по социальной лестнице связан с ухудшением здоровья.

Однако связь между социально-экономическим неравенством и плохим самочувствием объясняется не только неодинаковой доступностью медицинской помощи и большим количеством рисков. Такими факторами, как опасности, связанные с курением, употреблением алкоголя и зависимостью от фастфуда, или, наоборот, защита страхованием и посещение спортивно-оздоровительных комплексов, можно объяснить меньше половины различий в здоровье при разном уровне СЭС. Это наглядно показано в масштабных Уайтхолловских

ОБ АВТОРЕ

Роберт Сапольски (Robert Sapolsky) — профессор биологии, неврологии и нейробиологии в Стэнфордском университете и научный сотрудник в Национальных музеях Кении. В лаборатории он изучает повреждающее воздействие стресса на мозг и генную терапию нервной системы. Кроме того, в Восточной Африке он исследует дикие популяции павианов, пытаясь определить связь между иерархическим положением павиана и его здоровьем.



исследованиях, проводившихся под руководством эпидемиолога Майкла Мармота (Michael Marmot), где изучались риски для отдельных групп. Кроме того, такие же проблемы существуют в странах с всеобщим здравоохранением; если бы дело было в доступности медицинской помощи, то при всеобщем здравоохранении различия бы сгладились. Что-то другое, что-то достаточно сильное, должно быть связано с неравенством и вызывать проблемы со здоровьем.

Таким фактором, по-видимому, оказываются психологические последствия стресса из-за низкого СЭС. Психолог Нэнси Адлер (Nancy Adler) из Калифорнийского университета в Сан-Франциско с коллегами продемонстрировала: то, как люди оценивают свое положение по сравнению с положением других, предсказывает состояние здоровья не хуже, чем разные объективные факторы, такие как текущий уровень дохода. Исследование показывает, что слабое здоровье связано не столько с бедностью, сколько с ощущением бедности. Эпидемиологи Ричард Уилкинсон (Richard Wilkinson) и Кейт Пикетт (Kate Pickett) из Ноттингемского и Йоркского университетов соответственно дополнили картину деталями, показав, что хотя бедность вредна для вашего здоровья, еще хуже по всем показателям может быть нищета на фоне изобилия — неравенство. Это касается уровня младенческой смертности, общей продолжительности жизни, ожирения, уровня убийств и т.д. Здоровье особенно портится, если вас постоянно тыкать носом в то, чего у вас нет.

Как правило, чем сильнее выражено неравенство в обществе, тем хуже качество жизни. При сравнении разных стран и разных штатов США оказалось, что чем сильнее неравенство, независимо от абсолютного уровня дохода, тем больше преступлений, в том числе убийств, и большее количество заключенных. Добавьте к этому большее число случаев травмы в школе, подростковых беременностей и снижение уровня грамотности. Тут же больше психиатрических проблем, алкоголизма и наркозависимости, ниже уровень счастья и меньше социальная мобильность. И меньше социальной поддержки, поскольку выраженная иерархия — это противоположность равенству и гармонии, которые подпитывают дружбу. Такая мрачная картина помогает объяснить чрезвычайно важный факт, что при усилении неравенства здоровье страдает у всех.

Проблема затрагивает богатых так же, как и бедных. При усилении неравенства состоятельные люди обычно тратят больше ресурсов, чтобы отгородиться от мира трущоб. Я слышал, как экономист Роберт Эванс (Robert Evans) из Университета Британской Колумбии называл это «сепарацией богатых». Они тратят больше своих ресурсов на охраняемые резиденции, частные школы, бутилированную воду и дорогие натуральные продукты. И они дают много денег политикам, которые помогают богатым поддерживать их статус. Это большой стресс — воздвигать толстые стены, чтобы отгородиться от всего стрессорирующего.

Одно дело — знать, что все эти психологические и социальные факторы влияют на заболевания. И совсем другое — показать, как этот стресс делает свою грязную работу внутри организма. Каким образом СЭС и неравенство «просачиваются под кожу?» Оказывается, исследователи успешно приближаются к ответу. Мы многое узнали о том, как бедность влияет на работу организма, выяснилось, что проблема социального неравенства вызывает тревогу именно из-за присутствия бедной части населения. Ученым удалось проследить физиологические последствия неравенства в трех ключевых областях: хроническое воспаление, хромосомное старение и работа мозга.

Тяжелый груз

Когда в 1990-е гг. Брюс Макьюэн (Bruce McEwen) из Рокфеллеровского университета ввел понятие аллостатической нагрузки, в представлениях о биологии заболеваний произошла революция. Наши тела постоянно подвергаются воздействиям окружающей среды, и мы остаемся здоровыми, если, получив эти воздействия, возвращаемся к исходному состоянию, поддерживая гомеостаз. Раньше, в рамках этих представлений, ученые фокусировались на отдельных органах, которые сталкиваются с конкретными проблемами. Концепция аллостаза дает иную картину: физиологические проблемы вызывают широкий спектр реакций по всему телу. Например, заражение пальца ноги приведет не только к воспалению на конце стопы, но также и к более отдаленным изменениям в организме, начиная от получения энергии из брюшного жира, и заканчивая химической активностью мозга во время сна. Пока продолжается эта биологическая суматоха, большая часть

организма функционирует хуже, и урон для здоровья от этого может получиться не меньше, чем при сильных нарушениях в одном органе.

Тереза Симан (Teresa Seeman) из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе подхватила эту идею и проверила весь организм, оценивая различные биоиндикаторы износа, включая повышение кровяного давления, уровень холестерина, липиды в крови, индекс массы тела, молекулярные маркеры гипергликемии и уровень гормонов стресса. Она показала, что этот набор разнообразных показателей хорошо предсказывает уровень физического здоровья и смертность.

Последние исследования Симан, как и других ученых, продемонстрировали связь низкого СЭС с высокой аллостатической нагрузкой, потому что в этом случае тело постоянно и безуспешно сражается за возвращение к нормальному, нестрессированному состоянию. Эти открытия обозначили важную тему: если для взрослого СЭС предсказывает аллостатический износ, то у ребенка СЭС оставляет сильный след на всю жизнь. Низкий СЭС придает телам подростков предрасположенность к более раннему «старению». Однако ученые нашли и защищающие факторы. Хотя детство в бедном районе усиливает связь низкого СЭС с аллостатической нагрузкой, но если повезет и у матери будут время и силы заботиться о ребенке, это ослабит вредное воздействие.

Любой стресс может стать таким вредоносным воздействием. Оно не обязательно должно иметь отношение к деньгам, но обычно связано с социальным положением. Этот эффект показан и в моей собственной работе на павианах, свободно живущих в восточноафриканских саваннах. В группе павианов в зависимости от места животного в социальной иерархии оно испытывает больший или меньший стресс. Если вы павиан

Неравенство внутри организма

Жизнь в обществе с большим разрывом между богатыми и бедными создает постоянный социальный и психологический стресс. Во многих исследованиях показано, что это подтачивает организм разными путями, влияя на наш мозг, нашу иммунную систему и ДНК. Вот некоторые пути развития серьезных заболеваний и психических расстройств.

Префронтальная кора

Необходима для хорошего планирования и принятия решений, эта область ослабляется под влиянием гормонов стресса.

Гиппокамп

Эта область необходима для обучения и запоминания, активность здесь снижается, а сама структура уменьшается в размерах.

Миндалины

Отвечает за страх и тревожность, ее активность усиливается.

Мезолимбическая дофаминовая система

Нейронные сигналы в этой области необходимы для формирования мотивации, но они нарушаются и возрастает риск депрессии и формирования зависимости.

Хроническое воспаление

Это состояние, обусловленное работой иммунной системы и гормонов стресса, повреждает молекулы во всем теле, повышая среди прочего риск сердечно-сосудистых заболеваний и болезни Альцгеймера.

Кровеносная система

Кровяное давление поднимается, повышая риск атеросклероза и инсульта.

Метаболизм

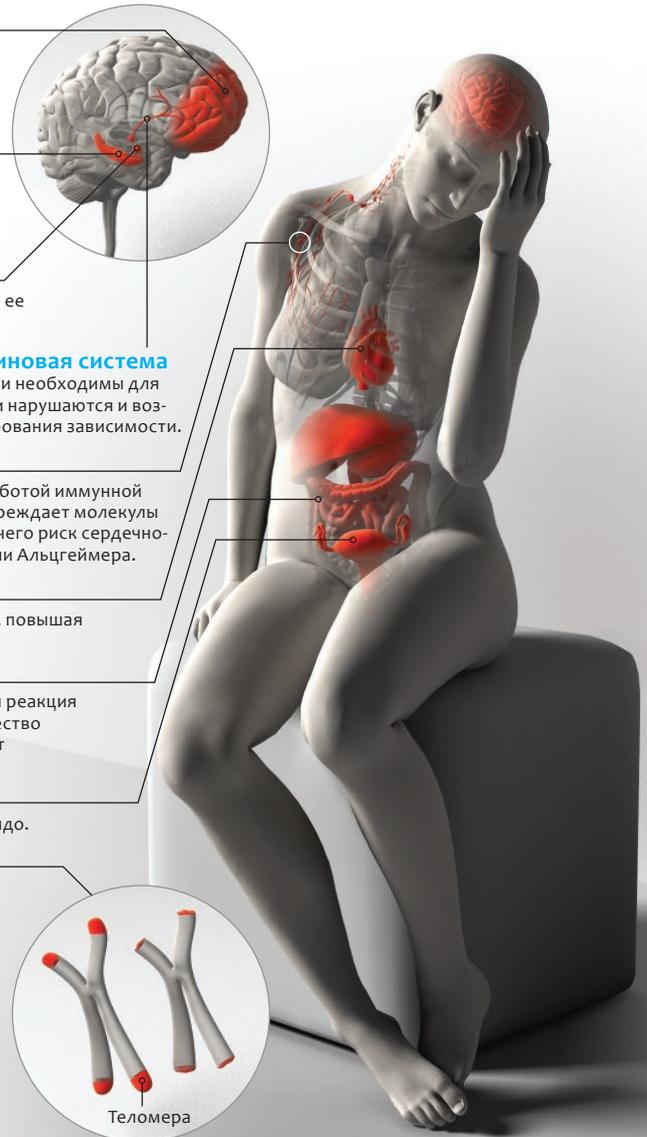
У клеток во всем теле понижается реакция на инсулин, увеличивается количество брюшного жира, все это приводит к развитию диабета.

Половые органы

Нарушаются фертильность и либидо.

Хромосомы

Целостность ДНК в наших хромосомах поддерживается маленькими молекулярными колпачками на концах, называемых теломерами (красный). Когда люди испытывают стресс из-за социальных условий, теломеры укорачиваются, хромосомы становятся уязвимыми и изнашиваются — своего рода преждевременное молекулярное старение.



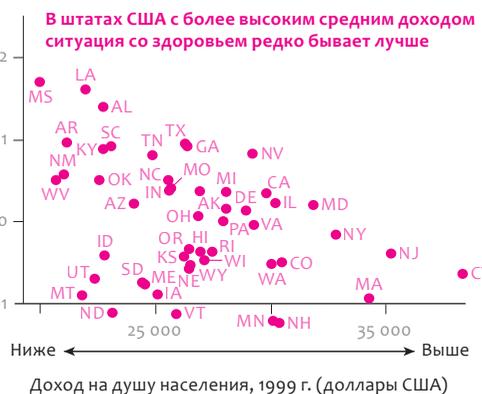
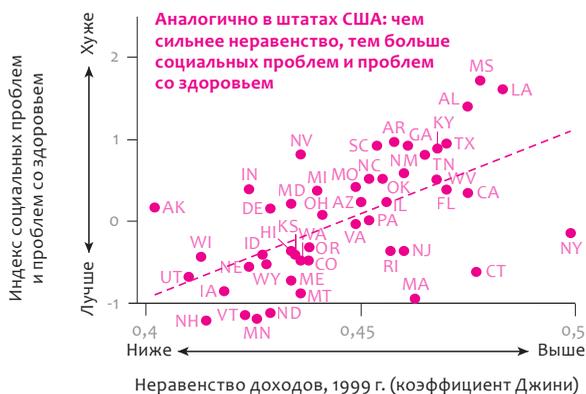
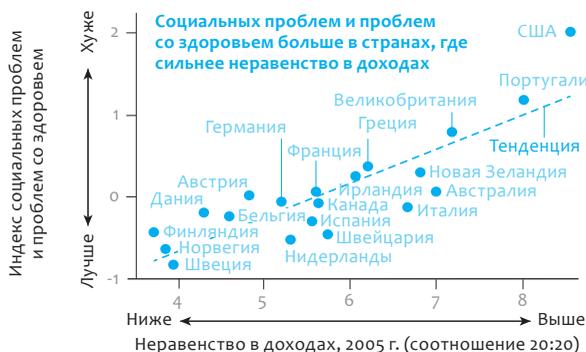
с низким рангом — это социально стрессовая ситуация, и в вашем теле будут нездоровые изменения уровня гормонов стресса, таких как кортизол. Кроме того, в организме будут наблюдаться патологические отклонения в функционировании половой, сердечно-сосудистой и иммунной систем.

Вызванный иерархическим положением стресс влияет на здоровье у людей и животных в основном через процесс воспаления. Воспаление — один из лучших примеров палки о двух концах

Здоровье в странах и штатах

Во всем мире, если растет неравенство доходов внутри общества, то увеличивается количество социальных проблем и проблем со здоровьем. Эпидемиологи Ричард Уилкинсон и Кейт Пикетт продемонстрировали эту связь в своей книге 2009 г. «Уровень духа» (*The Spirit Level*). Они проранжировали страны в соответствии с экономической оценкой, данной ООН, которая называется «соотношение 20:20» и сравнивает, насколько самые богатые 20% населения богаче, чем самые бедные 20%. По мере увеличения разрыва значение индекса, включающего в себя ожидаемую продолжительность жизни, младенческую

смертность, психические и другие проблемы, становилось все хуже. И эта тенденция не связана со средним доходом в этих странах. В штатах США ученые обнаружили такой же эффект. Исследователи проанализировали ситуацию в штатах, используя данные Бюро переписи населения США, так называемый коэффициент Джини, который сравнивает доход всего населения, а не только отдельных групп. И опять неблагоприятное воздействие на здоровье однозначно определялось неравенством и не могло быть объяснено средним доходом в штате.



Индекс социальных проблем и проблем со здоровьем включает в себя следующие компоненты:

- Продолжительность жизни
- Подростковые беременности
- Ожирение
- Психическое здоровье
- Убийства
- Лишение свободы
- Доверие/недоверие
- Образование
- Уровень младенческой смертности
- Социальная мобильность (только на уровне страны)

в биологии. Появляющееся после повреждения ткани воспаление окружает место травмы и запускает восстановление клеток. Однако хроническое обширное воспаление вызывает молекулярные повреждения по всему телу и, как показывают исследования, это способствует развитию различных заболеваний — от атеросклероза до болезни Альцгеймера. В последних исследованиях (включая мой собственный по воспалению в нервной системе) продемонстрировано, что хронически высокий уровень стресса может способствовать хроническому воспалению. У людей нищета в детстве приводит к повышенной склонности к воспалениям во взрослом возрасте, поскольку усиливается экспрессия воспалительных генов и увеличивается количество маркеров воспаления, таких как С-реактивный белок, который связан с повышенным риском сердечного приступа.

В работе Дженни Дун (Jenny Tung) из Дюкского университета показано, что у низкоранговых особей макак-резусов маркеров хронического воспаления больше, чем у доминирующих. Исследования на обезьянах позволили выявить наличие прямой связи между социальным стрессом и плохим здоровьем, поскольку у этих животных нет других факторов риска, таких как повышенный уровень курения и алкоголизма, которые мы часто наблюдаем у людей, обладающих низким социальным статусом.

Преждевременное старение ДНК

Влияние СЭС на организм стало яснее после изучения чувствительного маркера старения: участков ДНК на концах хромосомы, которые называются теломерами.

Теломеры помогают сохранять наши хромосомы неизменными — молекулярные биологи любят

THE SPIRIT LEVEL: WHY GREATER EQUALITY MAKES SOCIETIES STRONGER. KATE PICKETT AND RICHARD WILKINSON. BLOOMSBURY, 2009; BUREAU OF ECONOMIC ANALYSIS. U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. U.S. ECONOMIC DEVELOPMENT REPORT. 2007/2008; HUMAN SOLIDARITY: IN A DIVIDED WORLD. UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME, 2007 (GDP per capita data). Graphics by Jen Christensen

говорить, что они похожи на пластиковые наконечники на концах шнурков, предотвращающие изнашивание. Каждый раз, когда хромосомы удваиваются перед делением клетки, теломеры укорачиваются; когда они становятся слишком короткими, клетки больше не могут делиться и теряют многие полезные функции. Укорачивание теломер предотвращается с помощью фермента теломеразы, который восстанавливает эти концы. Таким образом, состояние теломер в клетке многое говорит о биологическом «возрасте», и укорочение теломер, допускающее уязвимость и потрепанность хромосомом, по сути отражает молекулярное изнашивание.

Биология теломер и психология стресса встретились в 2004 г. в исследовании специалиста по психологии здоровья Элисы Эпель (Elissa Epel) из Калифорнийского университета в Сан-Франциско и Элизабет Блэкберн (Elizabeth Helen Blackburn) из Института биологических исследований Солка. Блэкберн — лауреат Нобелевской премии за новаторскую работу о теломерах. Они проверили 39 человек, живущих в условиях постоянного тяжелого стресса: женщин, ухаживающих за хронически больными детьми. Выяснилось, что у этих женщин в белых клетках крови были укороченные теломеры, понижена активность теломеразы, а ферменты и другие белки получали большие повреждения из-за окисления (которое может отключить теломеразу). Чем дольше болеет ребенок, тем больше стресса испытывают женщины и тем короче их теломеры, даже если исключить влияние потенциальных побочных факторов, таких как диета и курение. Теломеры у людей обычно укорачиваются с примерно одинаковой скоростью, и вычисления показали, что по сравнению с группой с низким уровнем стресса у этих женщин теломеры укоротились примерно на дополнительные десять лет, а в некоторых случаях сильнее.

Вслед за этим открытием последовало множество дополнительных исследований, показывающих, что факторы, вызывающие стресс, такие как глубокая депрессия, посттравматическое стрессовое расстройство и переживание расовой дискриминации, могут ускорять укорочение теломер. Неудивительно, что при низком СЭС в детстве можно ожидать более коротких теломер во взрослом состоянии. Неблагополучный район, наблюдение или переживание насилия, семейная нестабильность (например, развод, смерть или лишение свободы одного из родителей) и другие особенности, характерные для бедности, в период детства связаны с укороченными концами хромосом во взрослом возрасте. Проведите свое детство в нищете — и к среднему возрасту ваши теломеры, возможно, будут примерно на десять лет старше, чем у тех, у кого было более удачное детство.

Таким образом, из-за нищеты изменения происходят везде, организм изнашивается начиная

с макроуровня, то есть систем органов, и заканчивая микроуровнем отдельных хромосом. В большинстве исследований длины теломер сравнивают у бедных и богатых, так же как в работах, сравнивающих аллостатическую нагрузку. Но в некоторых исследованиях рассматривается весь спектр неравенства, снижение статуса шаг за шагом, и показано, что каждая ступенька вниз по лестнице СЭС, как правило, соответствует худшему состоянию биологических показателей старения.

Выйти из-под контроля

Как показывают недавние биологические исследования, спуск по этим ступеням сопровождается также изменениями мозга и поведения. Моя лаборатория уже четверть века изучает, как длительный стресс влияет на мозг грызунов, обезьян и людей. Вместе с другими лабораториями мы выяснили, что одна из ключевых областей мозга, затронутых этой проблемой, — гиппокамп, отдел, необходимый для обучения и памяти. Непрерывный стресс или чрезмерное воздействие глюкокортикоидов ослабляют память, понижая возбудимость гиппокампа, способствуя уменьшению количества связей между нейронами и подавляя образование новых нейронов. Другая задействованная область мозга — миндалина, отвечающая за тревожность и страх. Стресс и глюкокортикоиды усиливают эти ощущения. Вместо подавления активности, как они делали в гиппокампе, в этой области, отвечающей за страх, они повышают возбудимость и способствуют увеличению числа нейронных связей. Совокупность этих открытий помогает объяснить, почему при посттравматическом стрессовом расстройстве атрофируется гиппокамп и увеличивается миндалина. Еще одна область, попадающая под воздействие, — мезолимбическая дофаминовая система, отвечающая за предвкушение и получение подкрепления, а также мотивацию. При длительном стрессе работа этой системы нарушается, и в результате возникает предрасположенность к ангедонии или формированию зависимостей.

Бомбардировка глюкокортикоидами также влияет на префронтальную кору (ПФК), отвечающую за долгосрочное планирование, целенаправленную деятельность и самоконтроль. Из-за социального стресса и повышенного уровня глюкокортикоидов в ПФК между нейронами ослабевают связи и замедляется взаимодействие. Нарушается процесс миелинизации — создания изолирующих оболочек между нервными волокнами для ускорения передачи сигнала. Снижается общий объем клеток в этой области, и возникает хроническое воспаление.

Что происходит при таких нарушениях в ПФК? Возникают глупые импульсивные решения. Рассмотрим «временные предпочтения»: если вы выбираете между немедленным вознаграждением и большим, которое можно получить, если

подождать, то чем дольше время ожидания, тем меньше хочется ждать. ПФК, как правило, справляется с этой проблемой. Но стресс усиливает «временные предпочтения»: чем больше хронический стресс, тем слабее ПФК активизируется во время экспериментов с отсроченным подкреплением. У людей, живущих в условиях большего неравенства, сниженная активность ПФК затрудняла выбор долговременного здоровья вместо немедленного удовольствия. Этим нейробиологическим эффектом можно объяснить, почему люди с большим уровнем стресса в жизни чаще страдают от ожирения, пьют и курят больше, чем люди с меньшим стрессом.

Такие изменения в ПФК происходят и у детей. В независимых исследованиях Марта Фара (Martha Farah) из Пенсильванского университета и Томас Бойс (Thomas Boose) из Калифорнийского университета в Сан-Франциско обнаружили, что в дошкольных учреждениях у детей с более низким СЭС обычно повышен уровень глюкокортикоидов, ПФК тоньше и менее активна, а связанные с ней самоконтроль и целенаправленность действий слабее выражены. По мере взросления детей эти эффекты усиливаются. К подростковому возрасту при более низком СЭС можно ожидать меньшего объема ПФК. А у взрослых при низком СЭС будет наблюдаться сниженная способность выбирать отсроченное подкрепление.

Некоторые из этих наблюдений поднимают сложный вопрос о курице и яйце. Возможно, изменения в мозге приводят к плохим решениям, которые погружают человека в еще большую нищету. Однако исследования говорят, что причины и следствия идут в ином порядке, начинаясь с СЭС и неравенства, влияющих на функцию ПФК, и только затем происходят другие неприятности.

Например, СЭС воспитанников детских садов позволяет предугадать, как работает их префронтальная кора, хотя вряд ли пятилетние дети скажились в нищету, промотав свою зарплату в барах или на ипподромах. Дополнительные доказательства были получены в исследовании 2013 г., которое провел Цзяин Чжао (Jiaying Zhao) из Университета Британской Колумбии с коллегами. Они проверили индийских фермеров, чье экономическое благополучие варьировало в зависимости от сезона. Когда их СЭС изменялся, переходя от нищеты во время посевного сезона к избытку после жатвы, следовали улучшения в работе ПФК.

На мой взгляд, самые важные доказательства были получены в исследовании, в котором СЭС у людей был понижен условиями эксперимента. У этих людей снижалась способность выбирать отсроченное подкрепление. В одном исследовании 2012 г. испытуемые играли в азартную игру друг против друга с разными стартовыми возможностями. «Бедные» с большей вероятностью

брали в долг до будущего заработка и были менее склонны замечать полезные подсказки о стратегии игры.

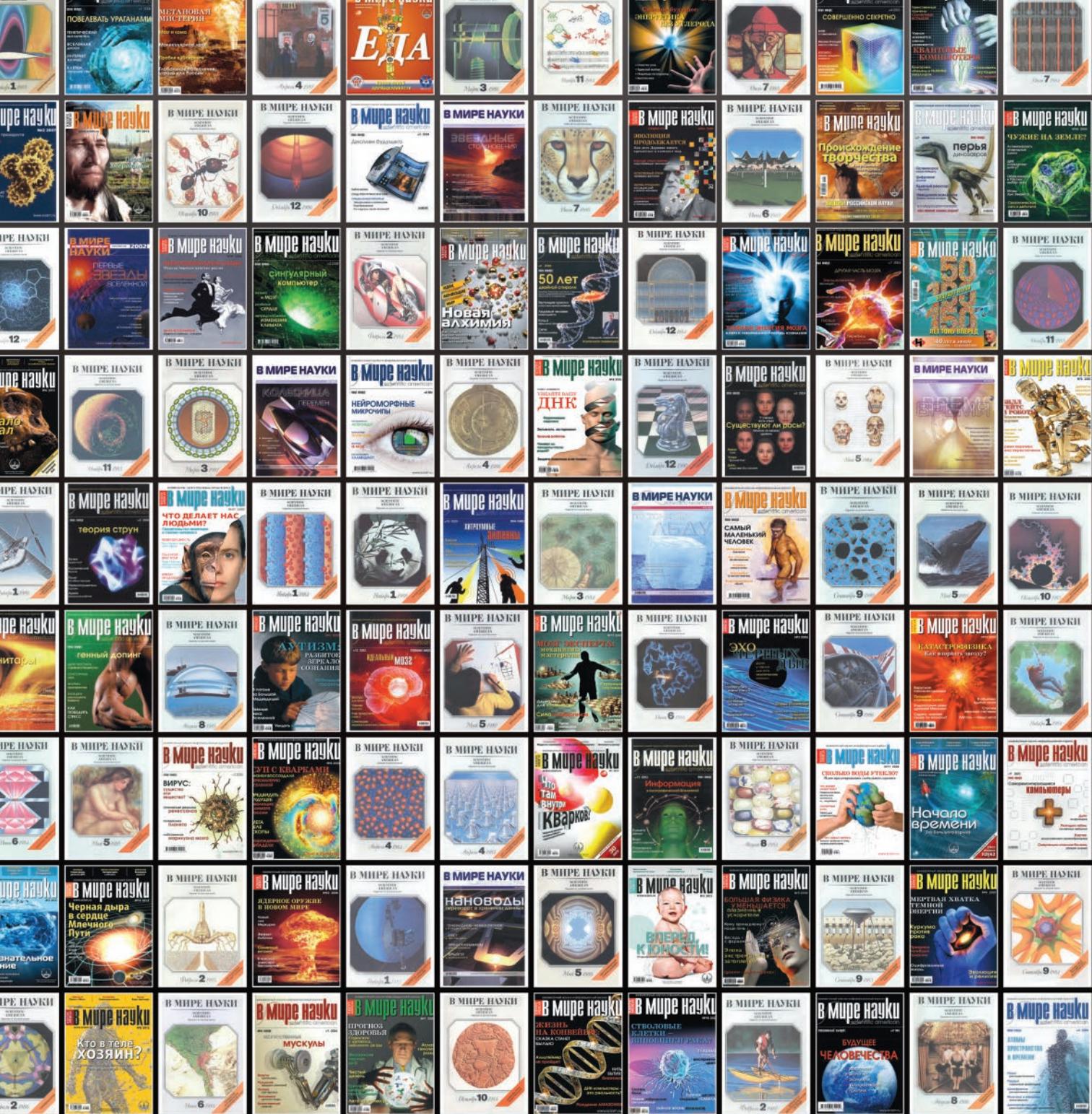
В другом исследовании хуже справлялись с отсроченным подкреплением те испытуемые, которым было предложено представить себе сценарии финансовых потерь, по сравнению с теми, кто представлял себе нейтральные или прибыльные сценарии. Еще в одном исследовании испытуемым предлагали представить их финансовые затраты на дорогой ремонт автомобиля. При этом когнитивные способности не изменились у участников с высоким СЭС, но ухудшились у более бедных.

Почему временное ощущение низкого СЭС запускает изменения в мышлении, характерные в реальности для людей с низким СЭС? Одно из объяснений заключается в том, что это рациональная реакция, потому что сложно думать об откладывании денег на старость, если их едва хватает на продукты. Нищета делает будущее менее актуальным. Но есть и другое объяснение, связанное с сильным стрессом: долгосрочное планирование и самоконтроль утомляют ПФК. Увеличьте когнитивную нагрузку, предложив задачи, где требуется участие ПФК, и испытуемые с большей вероятностью перестанут контролировать соблюдаемую диету. Или можно, и ученые так и сделали, повысить когнитивную нагрузку, искушая лакомствами испытуемых, соблюдающих диету, и тогда они хуже будут выполнять тесты, где работает ПФК. Насколько это отражает буквальное метаболическое «истощение» ПФК, а не падающую мотивацию, остается непонятно.

В любом случае, более низкий СЭС создает хроническое беспокойство о деньгах, которое отвлекает и изматывает. Сложно решать задачу о вычитании набора чисел или удерживать себя от употребления алкоголя, когда вы тревожитесь об арендной плате. Одно открытие в исследовании с воображаемым ремонтом автомобиля согласуется с этой интерпретацией. Когда испытуемые предполагали, что ремонт будет дешевым, участники с низким СЭС выполняли когнитивные задачи так же хорошо, как и те, у кого был высокий СЭС.

Конечно, нам надо лучше понять биологические последствия неравенства и научиться лучше лечить нанесенные им травмы. Но, честно говоря, мы кое-что знаем уже сейчас. Мы знаем достаточно, чтобы эта ситуация вызывала у нас праведный гнев. Возмутительно, что если дети были рождены не в той семье, то у них будет предрасположенность к проблемам со здоровьем уже к тому времени, когда они начнут учить алфавит. Чтобы доказать, что это неправильно, не нужны оценки воспаления или длины хромосом, но если такие измерения есть, они добавляют больше веса словам. ■

Перевод: М.С. Багоцкая



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





Illustration by Andrea Ucini

АВТО-МАТИЗАЦИЯ ПРЕДВЗЯТОСТИ



Как алгоритмы, разработанные, чтобы сократить бедность, наоборот, могут сохранить ее навсегда

Вирджиния Юбэнкс

В конце 2006 г. Митч Дэниелс, в то время губернатор штата Индиана, объявил о плане предоставить «самым нуждающимся жителям штата больше шансов на то, чтобы открыть мир, где вместо существования на пособие есть работа и достоинство». Он подписал контракт на \$1,16 млрд с консорциумом, включавшим ряд компаний, в том числе *IBM*, на автоматизацию и приватизацию процесса отбора для программ социального обеспечения штата Индиана.

Людям советовали вместо посещения окружных учреждений для заполнения заявлений на получение пособия подавать заявку через новую онлайн-систему. Около 1,5 тыс. государственных служащих перевели на негосударственные должности в региональных кол-центрах. Социальные работники, ранее отвечавшие за ведение реестров нуждающихся семей в местных службах социального обеспечения, теперь обрабатывали список задач, находящихся в очереди в их системе управления потоками работ. Дела могли поступить из любого уголка штата, каждый звонок переходил следующему свободному служащему. Правительство штата утверждало, что такой переход к электронным средствам связи повышает доступность услуг для нуждающихся, пожилых людей и лиц с ограниченными возможностями и экономит деньги налогоплательщиков.

От гроссбухов окружных рабочих домов до фотографических слайдов из Государственного

архива евгеники — в США долго собирали и анализировали обширную информацию о семьях бедняков и людей, принадлежащих к рабочему классу. Как и Дэниелс, современные политики и программные администраторы часто рассчитывают на автоматизацию в реформировании системы социальной помощи. Это направление иногда называют аналитикой бедности, цифровым регулированием бедности посредством сбора, совместного пользования и анализа данных. Она принимает разнообразные формы: от прогнозирования плохого обращения с детьми на основании статистических моделей до создания карт передвижения беженцев с использованием спутниковой съемки высокого разрешения. Современное возрождение аналитики бедности достигло апогея: захва-

тывающие дух оценки с использованием потенциала больших данных и искусственный интеллект для повышения благосостояния, осуществления контроля, вынесения приговора, обслуживания бездомных и т.д.

Похоже, все подобные проекты вдохновляет вера в то, что бедность — это, в первую очередь, проблема системного проектирования. Информация просто не поступает туда, куда нужно, следовательно, ресурсы используются неэффективно, возможно даже контрпродуктивно. Расцвет систем автоматизированного отбора, принятия решений, основанного на алгоритмах, и прогнозная аналитика часто преподносятся как революция в общественном управлении. Но это может быть просто переведенный в цифровую форму возврат к существовавшему в прошлом нормированию экономики, основанному на псевдонаучных представлениях.

ОБ АВТОРЕ

Вирджиния Юбэнкс (Virginia Eubanks) — политолог, доцент Университета штата Нью-Йорк в Олбани. Ее последняя книга — «Автоматизация неравенства: как высокотехнологичные средства составляют характеристики, контролируют и наказывают бедных» (*Automating Inequality: How High-Tech Tools Profile, Police, and Punish the Poor*, 2018). Живет в Трое, штат Нью-Йорк.



Наука о бедных

В 1884 г. Джозефин Шо Лоуэлл (Josephine Shaw Lowell) в опубликованном труде «Государственная помощь и частная благотворительность» (*Public Relief and Private Charity*) призвала правительства прекратить предоставление государственной помощи семьям, оказавшимся в бедственном положении из-за затяжных последствий депрессии 1873–1879 гг. Лоуэлл, основательница Общества организации благотворительности в Нью-Йорке, писала, что предоставление даже умеренной поддержки без предварительного изучения моральных качеств лиц, обратившихся за помощью, не улучшает ситуацию, а создает бедность, поощряя безделье и порок. Она обещала, что «частная благотворительная помощь должна и будет предоставляться в каждом случае, и не следует прибегать к государственным источникам обеспечения». Но как богатые филантропы могли взять на себя обязанности правительства по защите граждан страны от экономических потрясений? Лоуэлл предлагала простое решение: сделать благотворительность научно обоснованной.

Лоуэлл и другие сторонники так называемой научной благотворительности считали, что использование методов, основанных на данных и фактах, позволило бы разделить бедных на тех, кто заслуживает, и тех, кто не заслуживает помощи, и сделать социальную помощь более эффективной с точки зрения затрат и результатов. Это движение впервые стало применять методы, ныне известные как изучение условий жизни лиц, нуждающихся в материальной поддержке. Полицейские тщательно проверяли все аспекты жизни обратившихся за помощью и подтверждали их истории, опрашивая соседей, лавочников, докторов и священников. Так появилась практика составления характеристик и прогнозов, исследований моральных качеств и классификации на их основе, в результате которой появился не иссякший до сих пор поток данных о семьях бедняков и рабочего класса.

Современные защитники аналитики бедности считают, что качество государственных услуг улучшится, если мы будем использовать эти данные для получения «оперативной информации» о мошенничестве и бесполезных тратах. Дэниелс, например, обещал, что за предусмотренные контрактом десять лет штат Индиана сэкономит \$500 млн на управленческих расходах и еще \$500 млн за счет выявления обстоятельств, когда

отсутствуют основания для обращения за пособием, а также случаев мошенничества.

На самом деле частная система кол-центров только обострила отношения между социальными работниками и нуждающимися людьми, поскольку стало трудно убедиться в том, что семьи получают все положенные им пособия. То, что вместо личного обращения приоритет стали отдавать онлайн-заявкам, стало проблемой для малоимущих семей, половина которых не имеет доступа в интернет. Бумажные документы, накопленные за десятилетия, оцифровать не смогли, и получателям пособий пришлось предоставлять всю документацию повторно. Негибкая автоматизированная система не могла различить добросовестное заблуждение, бюрократическую ошибку и попытку мошенничества со стороны заявителя. Каждый сбой, независимо от того, была ли это забытая подпись или ошибка программы, интерпретировался как потенциальное преступление.

Результатом эксперимента с автоматизированным отбором в Индиане стал 1 млн отказов в предоставлении пособий за три года, на 54% больше по сравнению с предыдущим трехлетним периодом. Под давлением разгневанных граждан, законодателей (представителей обеих партий) и перегруженных местных властей в 2009 г. Дэниелс разорвал контракт с IBM, что привело к дорогостоящему судебному разбирательству, оплачиваемому из средств налогоплательщиков, которое продлилось восемь лет.

Необъективность наблюдения

В аналитике бедности руководствуются не только желанием сократить затраты и повысить результативность. Ее сторонники также преследуют похвальную цель: искоренить предвзятость. Все-таки скрытая расовая дискриминация в программах социального обеспечения имеет глубокие исторические корни.

В системе социального обеспечения детей традиционной проблемой было не исключение людей с другим цветом кожи, а непропорциональное включение их в программы, в связи с чем ситуацию в их семьях изучают чаще. Согласно данным Национального совета судей по делам несовершеннолетних и семьи, в 47 штатах детей-афроамериканцев забирают из семей с частотой, превышающей долю представителей этой расы в общей численности населения. Например, в округе Аллегейни, штат

Пенсильвания, в 2016 г. 38% детей, переданных под опеку, были афроамериканцами, хотя они составляют менее 19% детского населения в округе.

В августе 2016 г. Департамент социального обеспечения округа Аллегейни запустил средство статистического моделирования, которое, по их мнению, может предсказать, какие дети наиболее вероятно в будущем подвергнутся насилию или будут лишены родительской заботы. Программу обследования семей округа Аллегейни (AFST) разработала международная команда под руководством экономиста Римы Вайтхинатан (Rhema Vaithianathan) из Оклендского университета технологий в Новой Зеландии. В команду вошла также Эмили Патнэм-Хорнштейн (Emily Putnam-Hornstein), директор Сети данных о детях в Университете Южной Калифорнии. Эта программа извлекает информацию, собранную в окружном архиве, куда регулярно поступают выписки из десятков государственных программ, в том числе сведения об условно освобожденных, данные тюрем, окружных служб психиатрической помощи, отделов по поддержанию уровня доходов и государственных школ. Предоставляя данные за два десятка лет, Департамент соцобеспечения надеется, что, так как мнение людей субъективно, AFST сможет помочь сотрудникам дать улучшенные рекомендации о том, какие семьи требуют тщательного изучения для обеспечения защиты детей.

Реформаторы из движения научной благотворительности XIX в. утверждали, что более объективное принятие решений может трансформировать государственные программы, которые, как они считали, испорчены покровительством, политиканством «партийной машины» и узостью мышления в вопросах, касающихся национальных меньшинств. Но они рассматривали вопрос о необъективности слишком узко: по их мнению, дискриминация имела эпизодический и преднамеренный характер и была связана с эгоистическими интересами. Однако сторонники научной благотворительности не сумели распознать, что системная, структурная необъективность уже заложена в их, как предполагалось, объективных научных средствах и методах.

Основой научной благотворительности была, с одной стороны, строгая оценка, с другой — теория превосходства белой расы. Хотя представители этого движения превозносили научную благотворительность, как базирующуюся на фактах и ценностно нейтральную, они отказывались помогать только что освобожденным от рабства афроамериканцам и поддерживали ограничение иммиграции. Сторонники научной благотворительности также проявляли исключительный энтузиазм, защищая элиты белых от угроз, скрыто существовавших, по их мнению, внутри белой расы: низкого интеллекта, преступности

и необузданной сексуальности. По сути, это был эксперимент из области евгеники: попытка замедлить рост бедности за счет замедления роста численности в бедных семьях.

Несомненно, подобные AFST программные средства создаются исходя из стремления сдерживать такого рода фанатизм. Но необъективность людей — это встроенная функция моделей предсказания риска. AFST полагается главным образом на данные, собранные только о людях, обратившихся к государственным службам за поддержкой семьи. Более обеспеченные семьи могут нанять няню для ухода за ребенком или консультироваться у врача, чтобы избавиться от зависимости. Но поскольку они платят из своего кармана или пользуются частной страховкой, данные о таких людях не собирают в архиве. Таким образом, AFST может пропустить случаи насилия или отсутствия заботы о детях в семьях представителей среднего класса. Усиленное наблюдение за бедными систематически влияет на прогнозы модели, поскольку использование государственной поддержки само по себе интерпретируется как риск для детей. Проще говоря, модель «путает» заботу о детях в бедных семьях с плохой заботой о детях.

К счастью, в округе Аллегейни не так много случаев, приведших или едва не приведших к смерти детей, чтобы предоставить необходимый объем данных для достоверного моделирования, поэтому команда Вайтхинатан для оценки жестокого обращения с детьми использовала в качестве замены связанную переменную. После ряда экспериментов исследователи решили использовать вместо фактов причинения вреда помещение ребенка под опеку: те случаи, когда исходя из проверенной информации о малыше начинается расследование в отношении его семьи и в результате он передается под опеку на два года. Следовательно, предсказываемый моделью результат — это решение агентства по опеке и судебной системы об изъятии ребенка из семьи, а не сам факт жестокого обращения. Несмотря на то что такое проектное решение принято по необходимости, а не по злему умыслу, благополучие детей само по себе субъективно, поэтому плохо подходит для прогнозного моделирования.

Кроме того, хотя AFST выявил, что существует необъективность в отношении выбираемой для проверки информации, непропорциональность системы в отношении расовой принадлежности в основном появляется не на этом этапе. Как показывают проводимые округом собственные исследования, в действительности необъективность, связанная с расовой принадлежностью, начинается не с проверки, а с «указания направления». Общество общается о случаях насилия и об отсутствии заботы о детях в семьях афроамериканцев и смешанных браках в три и четыре раза чаще соответственно, чем о таких же случаях в семьях белых. Когда

поступают сообщения о детях, полномочия проверяющего, позволяющие действовать по усмотрению, не играют особой роли: проведенное в 2010 г. исследование показало, что сотрудники, принимающие обращения, проверяют 69% случаев, связанных с детьми афроамериканцев и детьми из смешанных браков, и 65% случаев, касающихся детей белых. По иронии, ослабление дискреционных полномочий проверяющего может привести к росту расовой несправедливости за счет исключения возможности «поставить диагноз» на том этапе, когда в результате подобной оценки можно преодолеть существующие в обществе предрассудки.

Преувеличение опасности ущерба — это результат склонности людей верить, что технология при принятии решений более объективна, чем мы сами. Однако экономисты и специалисты по данным с той же степенью вероятности, что и сотрудники, принимающие и проверяющие звонки, могут обладать ошибочными культурными представлениями о бедных семьях белых и бедных семьях людей с другим цветом кожи. Когда специалисты-разработчики создают подобные программы с учетом своих предположений, они скрывают важный политический выбор за прикрытым математикой фасадом технологической нейтральности.

Моделирование справедливости

Согласно предвзвтому мнению, которое часто разделяют администраторы и специалисты по данным, работающие в государственных службах, аналитика бедности — это система для сортировки, для осуществления сложного выбора: как использовать ограниченные ресурсы для обеспечения огромных потребностей. Однако решение признать, что некоторым людям будет предоставлена возможность для удовлетворения своих основных человеческих потребностей, а другим нет, — это политический выбор. Бедность — это не природная катастрофа, а результат системной эксплуатации и ошибочной политики.

Наука о данных действительно может сыграть роль в вопросах, связанных с большой несправедливостью. Передовые критики системы принятия решений на основе алгоритмов предлагают сосредоточиться при разработке на открытости, ответственности и ориентированности на человека, для того чтобы использовать потенциал больших данных для обеспечения социальной справедливости. Конечно, любая цифровая система, используемая для принятия решений в демократическом обществе, должна базироваться на этих ценностях. Но аналитика бедности ограничивает свое поле деятельности в лучшем случае постепенным повышением точности и справедливости систем, общественная польза которых вызывает вопросы. Сначала необходимо пересмотреть базовые принципы. Это означает признать, что в условиях системного

расизма, а также когда к бедным относятся сурово и объявляют их вне закона, лишенная ограничений аналитика приведет к усилению дискриминации и ухудшению экономического положения.

Следует начинать с испытания самореализуемых моделей — тех, что генерируют сам результат, который, как предполагается, они должны предсказывать. Например, если боязнь попасть в зону высокого риска по оценке AFST приводит к тому, что родители избегают обращаться в государственные службы, у этих людей может начаться стресс, который, в свою очередь, может вылиться в насилие или безразличие по отношению к детям. Необходимо также определить политические рычаги, способные остановить системы с негативными или нежелательными эффектами. Данные, собираемые такими системами, должны быть защищены, но, что более важно, их нельзя получать в принудительном порядке, чтобы семьи не чувствовали, что они обменивают одно из основных прав человека — на неприкосновенность частной жизни, безопасность или целостность семьи — на другое, такое как право на обеспечение пищей или жильем.

Наконец, необходимо установить ясные механизмы защиты тех, кто пострадал от системы аналитики бедности. Как указывается в «Белой книге» Всемирного экономического форума 2018 г. о дискриминации, связанной с машинным обучением, в подобных разрабатываемых и внедряемых автоматизированных системах принятия решения обязательно должны быть протоколы, предназначенные «для своевременного исправления любых результатов, имеющих дискриминационный характер» и такие, которые легко найти и применить.

Аналитика бедности не изменится кардинально до тех пор, пока мы не перестанем рассказывать лживые истории. Несмотря на распространенное мнение, бедность в США — это не просто отклонение от нормы. По данным исследования, проведенного социологами Марком Рэнком (Mark R. Rank) и Томасом Хиршлом (Thomas Hirschl), 51% американцев в возрасте от 20 до 64 лет в какой-то момент окажутся за чертой бедности и почти две трети обратятся в государственные программы оказания помощи по бедности, такие как *Needing Families* («Нуждающиеся семьи») или *Medicaid* (что вместо разработки сложных «термометров» для измерения моральных качеств нам необходимо укреплять почву под ногами. Это означает полностью финансируемые государством программы, гарантирующие достойную оплату и безопасные условия труда, поддержку в предоставлении ухода и укреплении здоровья, а также обеспечивающие защиту достоинства и самоопределения каждого. До тех пор пока этого не будет, мы занимаемся не модернизацией сортировки, а автоматизацией несправедливости. ■

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



Illustration by Andrea Ucini



ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЦЕНА НЕРАВЕНСТВА

Неравенство возможностей способствует ухудшению состояния окружающей среды, и бедные страдают от последствий

Джеймс Бойс

Осенью 2016 г. битва за окружающую среду в Северной Дакоте попала в заголовки СМИ по всему миру. Местное племя индейцев сиу из резервации Стэндинг-Рок и защитники окружающей среды выступили против представителей корпораций и правительства, поддерживающих строительство трубопровода *Dakota Access* для транспортировки сланцевой нефти из формации Баккен до терминала в Иллинойсе. При температуре воздуха около 0° С полиция применила водометы против протестующих, а частные охранники спустили служебных собак.

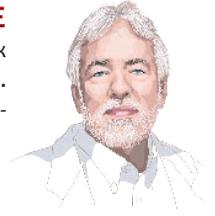
Индейцы опасались, что утечки нефти на участке трубопровода под водохранилищем вдоль реки Миссури приведут к загрязнению их источников водоснабжения. Защитники окружающей среды присоединились к протестующим, требуя прекратить растущую добычу ископаемого топлива. Сторонники реализации проекта стоимостью \$3,8 млрд утверждали, что он сэкономит средства нефтяной промышленности, так как транспортировка нефти по трубопроводу стоит меньше, чем по железной дороге, и его сооружение приведет к созданию новых рабочих мест и обеспечит эффект мультипликатора для местной экономики.

Поскольку цена нефти устанавливается на мировых рынках, экономия затрат не означает, что для потребителей нефть будет стоить дешевле, но прибыль производителей в результате увеличится.

К декабрю 2016 г. Инженерный корпус армии США объявил, что он не согласует строительство перехода трубопровода через реку. В лагере протестующих это решение было встречено шумным

ОБ АВТОРЕ

Джеймс Бойс (James K. Boyce) — почетный профессор экономики и старший научный сотрудник Исследовательского института политической экономии Массачусетского университета в Амхерсте. Автор готовящейся к выходу книги «Экономика для людей и планеты: неравенство в эпоху изменений климата» (*Economics for People and the Planet: Inequality in the Era of Climate Change*).



одобрением. Однако президент Доналд Трамп через четыре дня после вступления в должность в январе отменил постановление, и несколько месяцев спустя транспортировка нефти по трубопроводу началась.

Противостояние, похоже, показало, какова действительность: когда люди, получающие выгоду от использования или нанесения ущерба окружающей среде, обладают большей экономической и политической властью по сравнению с теми, кому может быть причинен вред, такой дисбаланс приводит к ухудшению состояния окружающей среды. И чем больше неравенство, тем больше ущерб. Более того, для людей, обладающих меньшей властью, ущерб, нанесенный окружающей среде, имеет в конечном итоге гораздо более серьезные последствия.

Мы наблюдаем подобные ситуации повсюду. Загрязняющие окружающую среду электростанции и свалки опасных отходов находятся в бедных районах. От загрязнения питьевой воды страдают общины меньшинств. Но всегда ли существует такая взаимосвязь между властью и ухудшением состояния окружающей среды? А если так, то почему? И что можно с этим сделать? В Стэндинг-Рок баланс между противоборствующими сторонами почти был достигнут, но избрание Трампа потянуло вниз одну чашу весов. Однако опыт, а также изменение баланса сил вселяют надежду, что меры по сокращению экономического и социального неравенства принесут пользу не только людям, но и окружающей среде.

Большее неравенство — больший ущерб

Серьезные исследования взаимосвязи между социальной властью и деградацией окружающей среды начались в 1990-х гг. Экономисты сообщили, что они обнаружили взаимосвязь между загрязнением и доходом на душу населения, и график, отражающий эту взаимосвязь, представляет собой параболу, ветви которой направлены вниз. На оси Y откладывали значения уровня загрязнения воздуха и воды, на оси X — средний доход, показатели сравнивали в десятках стран. При значениях годового дохода от \$0 до примерно \$8 тыс. уровень загрязнения увеличивался, но при дальнейшем росте доходов уровень загрязнения уменьшался. Эта закономерность стала известна как экологическая кривая Кузнецца из-за сходства с соотношением

между уровнем неравенства и средним доходом, которое открыл экономист Саймон Кузнец в 1955 г. во время знаменитого исследования.

Экологическая кривая Кузнецца, казалось, позволяла немного отдохнуть от мрачных прогнозов о том, что рост производства и потребления неминуемо ведет к еще большей деградации окружающей среды. Может быть, человечество не похоже на «раковую опухоль», рост которой «угрожает более крупному целому», как охарактеризовал наш вид историк охраны природы Родерик Нэш (Roderick Nash). Началась оживленная дискуссия между аналитиками, рассматривавшими экономический рост как решение экологических проблем, и теми, кто считал его сутью проблемы.

Меня не убедила ни одна из сторон. Возможно, потому, что я, когда мне было 20 с небольшим, жил в деревне в Бангладеш среди беднейших людей в мире. Этот опыт оставил неизгладимое впечатление и заставил понять, что человеческое общество невозможно точно оценить, используя данные о населении или среднедушевые показатели. Многие жители Бангладеш голодали, но не из-за того, что в стране перенаселение или продовольствия на всех не хватает. Продуктов было достаточно, и все же общины голодали, потому что у бедных не было денег, чтобы купить еду на рынке, и политической власти, чтобы получить ее другим способом. Экономист Амартья Сен (Amartya Sen) в своей книге «Бедность и голод» (*Poverty and Famines*), вышедшей в 1981 г., объясняет, что голод обычно начинается в сходных условиях. Неравенство в распределении богатства и власти, похоже, имеет принципиальное значение для функционирования общества.

В процессе размышлений о кривых Кузнецца — экономической и экологической — мне пришло в голову, что неравенство, а не доход на душу населения, лежит в основе деградации окружающей среды: судя по всему, оба показателя растут и снижаются одновременно. Когда мы с аспирантом Мариано Торрасом (Mariano Torras) заново проанализировали экологическую кривую Кузнецца в 1998 г., мы обнаружили следующее: в странах с более низким уровнем грамотности среди взрослого населения, большим ограничением политических прав и гражданских свобод и более высоким неравенством в доходах (эти показатели мы рассматривали как индикаторы более неравномерного распределения власти) наблюдается тенденция к более

высокому уровню загрязнения воздуха и воды. В результате проверки по указанным показателям кажущаяся зависимость от среднедушевого дохода ослабевает, а для некоторых загрязнителей полностью исчезает. Мы также установили, что большее неравенство связано с ограничением доступа к чистой питьевой воде и системам санитарии — критически важным как для человека, так и для окружающей среды.

В ходе последующего исследования в 1999 г. мы с моими соавторами изучали ситуацию в 50 американских штатах. Мы проанализировали взаимосвязь между эффективностью политики в области окружающей среды и распределением власти, используя в качестве показателей участие в выборах, долю взрослого населения со средним общим образованием, справедливость налогообложения и доступ к программе медицинского страхования *Medicaid*. Мы обнаружили, что более высокий уровень неравенства связан с более слабой политикой в области охраны окружающей среды, а более слабая политика — с большей нагрузкой на окружающую среду и слабой системой здравоохранения. Эти результаты показывают, что серьезное влияние неравенства на здоровье связано не только с физиологическим стрессом, насилием и ограниченным доступом к медицинским услугам, что зафиксировано исследователями в области здравоохранения, но и с воздействием на окружающую среду.

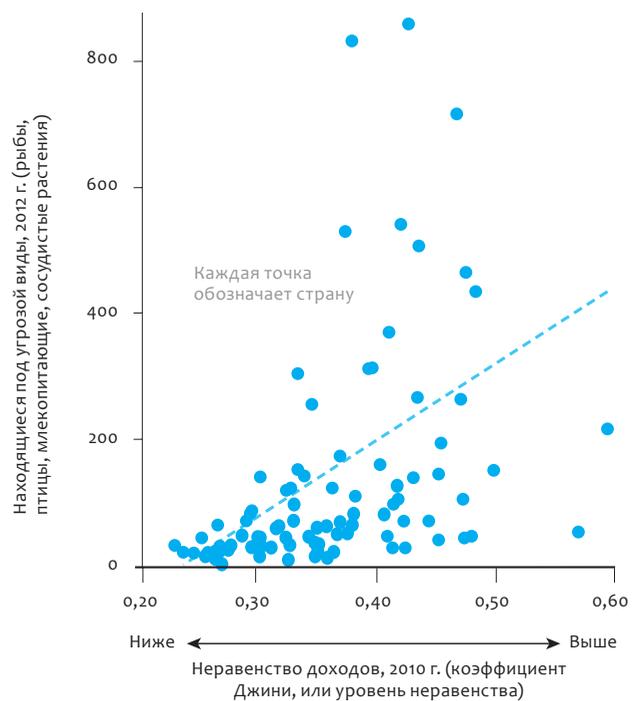
Первая реакция на наше исследование была довольно прохладной. В 1990-е гг., когда в моде были свободные рынки и отсутствие регулирования, от проблем неравенства отмахивались, как от устаревших и даже глупых. Один из рецензентов заявил, что я ставлю не на ту лошадь.

Тем не менее в 2000-х гг. неравенство вновь стало центральной политической проблемой. Растущий разрыв между 1% и всеми остальными, ужасные последствия урагана «Катрина» для малоимущих жителей Нового Орлеана и диспропорции в экономике, последовавшие за финансовым кризисом 2008 г., — вопросы, связанные с неравенством, вновь были поставлены на повестку дня. В это же время появилось множество данных о том, что большая концентрация богатства и политической власти приводит к ухудшению экологических показателей, и не только относительно загрязнения воздуха и воды. Ученые установили, что в странах с большим неравенством в распределении дохода выше доля растений и животных, которым угрожает уничтожение или исчезновение. Уровень обезлесения выше в странах с высоким уровнем коррупции. Государственные расходы на исследование и разработки в области охраны окружающей среды, а также на патентование изобретений в области экологии меньше в индустриальных странах с более высоким уровнем неравенства.

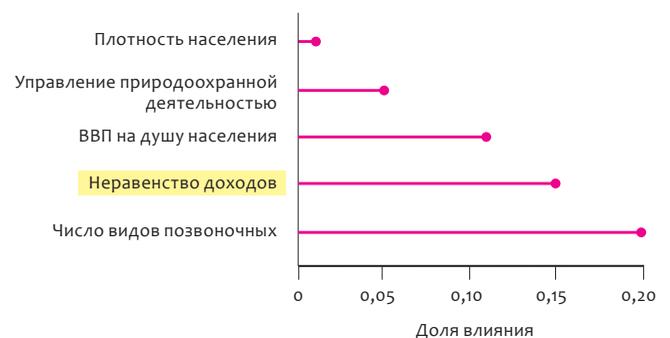
Выше неравенство — меньше видов

Множество исследований показывают, что по мере увеличения разрыва между богатыми и бедными по всему миру растет размер ущерба для окружающей среды. Например, одно исследование выявило, что в странах с более высоким уровнем неравенства в доходах более высокая доля видов, находящихся, согласно классификации Международного союза охраны природы, под угрозой исчезновения **1**. В особом докладе отмечено, что наблюдается более сильная корреляция между неравенством в доходах и утратой видов по сравнению с другими основными факторами, такими как плотность населения и даже политика в области окружающей среды **2**. Только общее число видов имеет большее значение.

1 Виды, находящиеся под угрозой исчезновения в странах по всему миру



2 Факторы, связанные с утратой видов



Большее неравенство также связано с более высоким объемом выбросов углерода на душу населения и на единицу валового внутреннего продукта.

SOURCES: "INEQUALITY AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY," BY S. MAZRUI ISLAM, UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, WORKING PAPER NO. 145, UNITED NATIONS, AUGUST 2015 (number of species threatened); "A CROSS-NATIONAL ANALYSIS OF HOW ECONOMIC INEQUALITY PREDICTS BIODIVERSITY LOSS," BY TIMOTHY C. HOLLAND, GARRY D. PETERSON AND ANDREW GONZALEZ, IN CONSERVATION BIOLOGY, VOL. 33, NO. 5, OCTOBER 2009 (factors linked to species loss); Graphics by Jen Christensen



Протест местных коренных американцев, встревоженных возможностью загрязнения источников водоснабжения, по поводу трубопровода Dakota Access в Северной Дакоте перерос в более масштабные выступления по всей стране против корпораций и политиков, обладающих большей властью, чем малоимущие общины

Эти исследования важны, если принять во внимание, что при более низком уровне неравенства люди имеют больше возможностей для охраны воздуха, воды и природных ресурсов, от состояния которых зависят их здоровье и благополучие. Защита окружающей среды и уменьшение неравенства идут рука об руку.

Право сильного

В результате любой деятельности, вызывающей деградацию окружающей среды, появляются выигравшие и проигравшие. Некоторым людям эта деятельность приносит прибыль, иначе никто бы ею не занимался. А некоторые испытывают последствия на себе, в противном случае деградация окружающей среды не рассматривалась бы как проблема. В связи с этим возникает главный вопрос: почему те, кто получает от такой деятельности прибыль, заставляют других расплачиваться за последствия деградации окружающей среды?

На этот вопрос существуют три возможных варианта ответа, каждый из которых так или иначе связан с неравенством возможностей. Первый вариант: такие последствия станут проблемой

будущих периодов и будущих поколений. В этом случае, так же как и в случае с долгосрочными последствиями изменения климата, единственная возможность спасти окружающую среду — ныне живущим взять на себя ответственность за тех, «чьи лица пока скрыты под землей — нерожденных, будущего Народа», выражаясь словами из конституции ирокезов.

Второй возможный вариант: люди, которым наносится вред, не знают об этом или не знают источник его происхождения. Например, они видят, что их дети болеют, но не понимают, что причина заболевания — выбросы находящегося поблизости нефтеперерабатывающего завода или электростанции. В подобных случаях решением служит обеспечение доступа к информации и, в частности, проведение политики, гарантирующей право общества знать о неблагоприятном воздействии окружающей среды и его источниках.

Наконец, возможен третий вариант. Люди хорошо осведомлены о том, что на них приходится главный удар, и знают источники, но у них нет достаточной экономической и политической власти, чтобы добиться своего при принятии социальных решений об использовании природных ресурсов

и нанесении ущерба окружающей среде. Пример — Стэндинг-Рок. В этом случае решить проблему можно, изменив баланс сил.

Решения правительства, влияющие на окружающую среду, часто включают анализ затрат и результатов: какую прибыль можно извлечь и при каких издержках? В этом расчете экономическая власть (также известная, как покупательная способность) играет ключевую роль. Люди с большим кошельком фактически владеют большинством голосов.

Когда люди, которым может быть нанесен вред, почти не обладают политической властью, те, кто принимает решения, могут свести к минимуму или игнорировать издержки и последствия. Крайний случай подобной ситуации иллюстрирует недавно проведенная оценка затрат и результатов, выполненная Агентством по охране окружающей среды США для отмены плана «Чистая энергетика» (*Clean Power Plan*). Уровень влияния на климат за пределами США просто приняли равным нулю, мотивируя это тем, что ущерб для людей за пределами страны не должен приниматься во внимание при разработке политики Соединенных Штатов в области климата.

Покупательная способность и политическая власть обычно связаны: те, у кого больше долларов, часто имеют большее политическое влияние, и наоборот. Совместный эффект денег и власти можно описать в рамках концепции, которую я называю принципом влияния власти при принятии социальных решений. Это означает, что приписываемая величина издержек и выгод от осуществления деятельности, наносящей вред окружающей среде, зависит от могущества людей, которых это затрагивает. Когда те, кто получает выгоду от деятельности, негативно влияющей на окружающую среду, обладают богатством и властью в отличие от тех, кому наносится вред, социальные решения выносятся в пользу выигрывающих. Чем больше неравенство между богатыми и бедными, между теми, кто обладает большей властью, и менее могущественными, тем больше степень деградации окружающей среды.

Неравенство возможностей также усугубляет ситуацию с отсутствием заботы о будущих поколениях и нехваткой знаний об ущербе для окружающей среды. Когда уровень неравенства высок, для беднейших людей необходимость выживать изо дня в день может вытеснить беспокойство о завтрашнем дне; боязнь когда-нибудь потерять влияние способствует тому, что очень богатые люди относятся к природным ресурсам по принципу «Хватай и беги» (пример тому — хищническая вырубка лесов в Юго-Восточной Азии в 1960-х и 1970-х гг. при филиппинском диктаторе Фердинанде Маркосе и индонезийском диктаторе Сухарто). При большом неравенстве высока вероятность, что

бедняки не имеют доступа к информации, в том числе о природе и причинах неблагоприятного воздействия на окружающую среду, причиняющего им вред.

Орел — мой выигрыш, решка — ваш проигрыш

Исходя из принципа влияния власти при принятии социальных решений можно предсказать, что не только большее неравенство приведет к большому ущербу для окружающей среды, но что максимальный ущерб будет нанесен общинам, находящимся в нижней части шкалы благосостояния и власти. В глазах принимающих решения вред для окружающей среды в таких местах имеет меньшую важность. Расовые и национальные меньшинства и общины с низким уровнем доходов находятся в зоне наибольшего риска. Резервация Стэндинг-Рок, в которой 40% жителей (в три раза выше национального показателя) находятся за официальной чертой бедности, была уязвима и в том и в другом отношении.

В то же время выгоды от осуществления деятельности, разрушающей окружающую среду, — увеличение прибыли производителей и снижение цен для потребителей — получают находящиеся на верхушке экономической шкалы. Прибыль идет в карман акционеров и руководителей корпораций, в основном довольно состоятельных. И чем больше потребители расходуют, тем больше они выгадывают от снижения цен, соответственно, еще большую прибыль получают состоятельные производители.

Это не значит, что влиятельные люди не хотят, чтобы окружающая среда была чистой и безопасной. Но в значительной степени качество окружающей среды стало тем, что экономисты называют квазиобщественным благом. Оно неодинаково доступно для всех. Состоятельные люди могут себе позволить жить в более чистых местах, покупать бутилированную воду и кондиционеры и получать более качественную медицинскую помощь. Они также могут более эффективно препятствовать размещению объектов негативного воздействия рядом с местом их проживания. Поскольку экологический ущерб непосредственно их не касается, они с большей легкостью позволяют себе его игнорировать. Даже когда богатые люди не могут полностью избежать последствий деградации окружающей среды, на их долю приходится относительно малая часть по сравнению с размером получаемой выгоды.

Экологическая справедливость

Исследователи с 1980-х гг. систематически фиксируют, что в США расовые и этнические меньшинства и малообеспеченные общины чрезмерно подвергаются воздействию неблагоприятных экологических факторов. В одном из первых

исследований социолог Роберт Буллард (Robert Bullard) изучал расположение объектов размещения опасных отходов в Хьюстоне и обнаружил, что в основном они находятся в районах, где проживают афроамериканцы.

Последующие исследования показали, что сходная закономерность наблюдается во многих частях страны: существует сильная взаимосвязь между расовой и этнической принадлежностью и близостью расположения и влиянием объектов негативного воздействия. Ученые также анализировали, как можно объяснить подобную корреляцию. Споры возникли по поводу очередности событий: экологически опасные объекты построили там, где уже проживали менее богатые и влиятельные общины? Или уже после строительства таких объектов более состоятельные жители уехали, стоимость недвижимости упала и в эти районы переселились люди с меньшим доходом? Вряде исследований этот вопрос изучался непосредственно, но как раз в тех, где были получены результаты, подтверждающие, что подобные токсичные объекты с самого начала размещали в местах проживания общин, обладающих меньшим влиянием. Данные также показывают, что в случаях, когда более состоятельные люди уезжали после возведения объекта, этот процесс начинался еще до строительства. Это свидетельствует о том, что общины в переходном периоде более уязвимы при решении вопроса о размещении объектов негативного воздействия в районах их проживания.

От непропорционального воздействия загрязненной окружающей среды страдают дети: растет смертность в младенческом возрасте, дети рождаются с более низкой массой тела, увеличивается частота нарушений развития нервной системы, а также частота и тяжесть приступов астмы, снижается успеваемость в школе. Взрослые люди теряют рабочие дни из-за собственной болезни или необходимости ухаживать за больными детьми. Со временем негативные последствия для здоровья приводят к усилению неравенства, в результате которого общины становятся более уязвимы, в первую очередь к воздействию неблагоприятных экологических факторов.

Несмотря на то что в наибольшей степени страдают общины, находящиеся в зоне риска, часто

эффект распространяется на более широкие группы населения. Например, в крупных городах США с большей сегрегацией в жилищном секторе по расовому и этническому признаку увеличивается риск заболевания раком в результате загрязнения воздуха, причем для всех жителей, а не только небелых. В городах страны, входящих в 5% городов с самым высоким уровнем расового и этнического неравенства, касающегося воздействия техногенного загрязнения воздуха, испанское белое население в среднем больше страдает от неблагоприятных факторов, чем в городах, где различия по степени негативного воздействия меньше. Экологическая справедливость выгодна всем.

Экологическое неравенство наблюдается повсюду. В Англии и Нидерландах в более бедных райо-

нах и районах с небелым населением в воздухе фиксируется более высокая концентрация взвешенных частиц и оксидов азота, которая приводит к возникновению и обострению проблем с дыханием. В Дели, жители которого дышат наиболее загрязненным воздухом, бедные живут в более загрязненных районах. Во время работы они также проводят больше времени вне помещений, в том числе и вдоль дорог, около которых самый высокий уровень загрязнения

воздуха. Эти люди не могут себе позволить кондиционеры или очистители воздуха. При этом они получают меньше всего выгоды от деятельности отраслей промышленности, вызывающих загрязнение, включая электроэнергетику и транспорт.

Принцип влияния власти при принятии социальных решений действует и на международном уровне. От экологического ущерба чрезмерно страдают самые бедные страны. В меморандуме 1991 г. Лоуренс Саммерс (Lawrence Summers), бывший тогда главным экономистом Всемирного банка, написал, что «есть неоспоримая экономическая логика в том, чтобы вывозить токсичные отходы в беднейшие страны», потому что там размер упущенных доходов от заболеваний и смертности будет минимальным. Это заявление, возможно, было ироническим, но в природоохранной деятельности часто действуют по такому сценарию. Каждый год миллионы тонн токсичных отходов транспортируют из промышленно развитых стран в государства Африки, Азии и Латинской Америки с низким уровнем дохода.

В крупных городах США с большей сегрегацией в жилищном секторе по расовому и этническому признаку увеличивается риск заболевания раком в результате загрязнения воздуха, причем для всех жителей, а не только небелых

Базельская конвенция о контроле над трансграничной перевозкой опасных отходов и их удалением — международное соглашение в области охраны окружающей среды, вступившее в силу в 1992 г., — оказалась неспособна остановить этот поток. Учитывая расстояние между людьми, получающими выгоду от экономической деятельности, в результате которой образуются отходы, и теми, кто испытывает на себе последствия от их размещения, поговорка «С глаз долой — из сердца вон» приобретает мрачный смысл.

Новый энвайронментализм

Так что же можно сделать, чтобы снизить социальное и экологическое неравенство и, следовательно, уменьшить вред, наносимый людям и планете?

Взаимоотношения между неравенством и окружающей средой — это «улица с двусторонним движением». Уменьшение неравенства в распределении богатства и власти содействует обеспечению более чистой окружающей среды. Усилия по защите права на чистую и безопасную окружающую среду способствуют обеспечению большего равенства. Главное и в том и в другом — мобилизация для осуществления изменений.

В XX в. целью энвайронментализма в США была защита природы от людей. Просвещенные элиты нередко считали себя защитниками природы от безответственных народных масс. Отсюда оставался всего лишь шаг до принятия неизбежного компромисса между защитой окружающей среды и экономическим благосостоянием в широких масштабах.

В XXI в. мы наблюдаем расцвет нового энвайронментализма. Его цель — защитить людей, страдающих от ущерба, нанесенного окружающей среде, от тех, кто получает выгоду от ухудшения. Баланс сил между этими сторонами может меняться со временем. Когда защитники окружающей среды со всей страны присоединились к коренным американцам из Стэндинг-Рок, чтобы утвердить их право на чистую и безопасную окружающую среду, стрелка весов начала двигаться. Протестующие, основываясь на ранее достигнутых успехах движения за равные права и защиту окружающей среды, подошли близко к тому, чтобы остановить многомиллиардное предприятие.

В других, менее широко освещавшихся случаях, новый энвайронментализм одержал важную победу. В штате Вашингтон, например, активистам удалось заблокировать предполагавшееся строительство самого крупного в стране угольного терминала и сохранить земли и источники водоснабжения племенных общин. Строительство еще одного угольного терминала — в Окленде, штат Калифорния, — сначала было предотвращено сторонниками экологической, трудовой и экономической справедливости, но юридические

проблемы еще не решены. В Монтане индейцы племени черноногих выиграли процесс о расторжении аренды земель площадью 9,3 тыс. га под объекты энергетики. Это стало кульминацией 30-летней борьбы.

Существование тесных связей между неравенством и состоянием окружающей среды позволило осознать, что если мы хотим восстановить баланс в отношениях человека с природой, нам необходимо восстановить баланс во взаимоотношениях друг с другом. ■

Перевод: С.М. Левензон

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Дитон А. Угроза неравенства // ВМН, № 11, 2016.
- **Джозеф Стиглиц**
- The Price of Inequality: How Today's Divided Society Endangers Our Future. Joseph E. Stiglitz. W.W. Norton, 2012.
- The Great Divide: Unequal Societies and What We Can Do about Them. Joseph E. Stiglitz. W.W. Norton, 2015.
- Rewriting the Rules of the American Economy: An Agenda for Growth and Shared Prosperity. Joseph E. Stiglitz. W.W. Norton, 2015.
- Globalization and Its Discontents Revisited: Anti-globalization in the Era of Trump. Joseph E. Stiglitz. W.W. Norton, 2017.
- **Роберт Сапольски**
- Why Zebras Don't Get Ulcers: The Acclaimed Guide to Stress, Stress-Related Diseases, and Coping. Third edition. Robert M. Sapolsky. Holt Paperbacks, 2004.
- The Spirit Level: Why Greater Equality Makes Societies Stronger. Richard Wilkinson and Kate Pickett. Bloomsbury Press, 2010.
- Behave: The Biology of Humans at Our Best and Worst. Robert M. Sapolsky. Penguin Press, 2017.
- **Вирджиния Юбэнкс**
- Automating Inequality: How High-Tech Tools Profile, Police, and Punish the Poor. Virginia Eubanks. St. Martin's Press, 2018.
- **Джеймс Бойс**
- Inequality and Environmental Protection. James K. Boyce in Inequality, Cooperation, and Environmental Sustainability. Edited by Jean-Marie Baland, Pranab Bardhan and Samuel Bowles. Princeton University Press, 2006.
- The Haves, the Have-Nots, and the Health of Everyone: The Relationship between Social Inequality and Environmental Quality. Lara Cushing et al. in Annual Review of Public Health, Vol. 36, pages 193–209; March 2015.
- Economic Inequality and the Value of Nature. Moritz A. Drupp et al. in Ecological Economics, Vol. 150, pages 340–345; August 2018.

ИГОЛКА



АРХЕОЛОГИЯ

Новый метод, позволяющий определить, кому принадлежали маленькие фрагменты ископаемых костей, помогает ответить на важные вопросы: когда, где и как одни виды человека взаимодействовали с другими

Катерина Дука и Томас Хайем

Среди ископаемых осколков могут
быть ценнейшие человеческие кости,
проблема в том, как их выявить

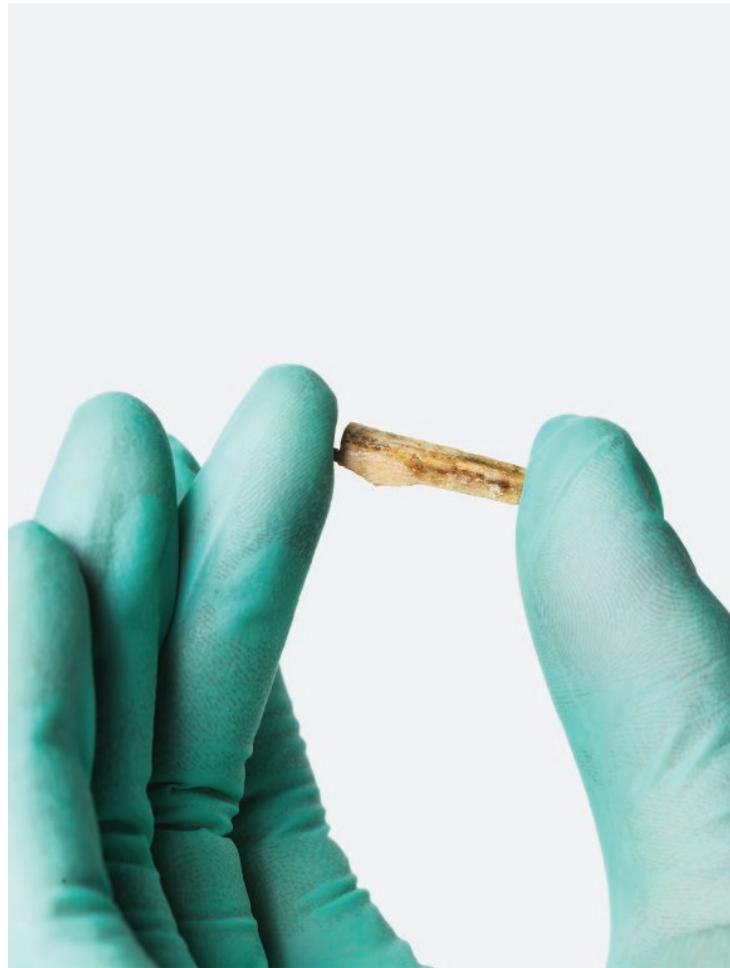


В СТОГЕ СЕНА

Добравшись в Денисову пещеру, расположенную в южной части Сибири, всегда испытываешь невероятное облегчение.

После одиннадцатичасовой тряски в автомобиле от Новосибирска на юг по степям и предгорьям Алтая за очередным поворотом грунтовой дороги внезапно появляется полевой лагерь — и все неприятные ощущения от долгого путешествия словно испаряются. В пейзаже преобладают окруженные крутыми склонами долины, стремительные реки и традиционные деревянные дома местных жителей, а над головой парят беркуты. В нескольких сотнях метров отсюда, высоко над рекой Ануй, находится та самая известняковая Денисова пещера, которая привлекает возможностью провести самые яркие исследования в области происхождения человека.

Денисова пещера стала центром революции, перевернувшей представления научного сообщества о том, как жили и взаимодействовали между собой наши предки в раннем палеолите. Наш вид *Homo sapiens* появился в Африке сотни тысяч лет тому назад. И когда он начал распространяться в Европу и Азию, то встретился там с другим видом человека, неандертальцами, которые, прежде чем исчезнуть окончательно, тысячелетиями сосуществовали на одной территории с *Homo sapiens*. Ученые знают, что эти виды встречались, потому что от наших предков современным людям достались фрагменты



Фрагмент кости из Денисовой пещеры. Благодаря зооархеологии с помощью масс-спектрометрии (ЗооМС) недавно удалось определить, что он принадлежал человеку или человекообразной обезьяне.

ДНК, полученные в результате скрещивания *Homo sapiens* с другими видами человека. Однако мы еще не знаем, когда и где пересекались их пути, как часто они скрещивались и как повлияли друг на друга в культурном плане. В то же время нам известны результаты нескольких важных археологических раскопок, соответствующих этому переходному периоду, где встречаются каменные орудия и другие

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- В середине и конце каменного века человек (*Homo sapiens*) распространялся из Африки по Евразии. Вслед за тем на всей этой территории исчезли группы архаичных людей, в том числе неандертальцы и денисовские люди.
- Исследователи стремятся понять, какими были взаимодействия между разными группами людей и сколько они длились. Однако в местах многих археологических раскопок того периода нет костей, видовую принадлежность которых можно было бы однозначно определить по их анатомическому строению.
- Сейчас, используя сочетание различных методов, ученые могут проверить множество неидентифицированных костных фрагментов, выбрать среди них те, которые можно отнести к определенному периоду, и секвенировать их ДНК. Таким образом уже удалось сделать несколько открытий о взаимодействии людей разных видов.

артефакты. Однако во многих из них, в том числе и в Денисовой пещере, нет ископаемых останков, по внешнему строению которых можно было бы определить их видовую принадлежность. Это не позволяет нам установить, что и когда делал каждый конкретный вид.

Сейчас ученые наконец сумеют ответить на эти вопросы благодаря новой методике, которая называется «зооархеология с помощью масс-спектрометрии» (ЗооМС). Мы можем, анализируя строение белка коллагена, сохранившегося в этих, казалось бы, неинформативных останках, выяснить, принадлежит ли кость гоминиду (человеку или другой человекообразной обезьяне), а затем попытаться выделить ДНК из образца. Таким образом можно определить кость с точностью до вида, будь это *Homo sapiens*, неандерталец или кто-то еще. Более того, мы можем провести тесты для определения возраста останков.

Непосредственное определение возраста ископаемых останков — это разрушительный процесс, приходится жертвовать костью для ее анализа. Поэтому музейные хранители обычно не хотят давать целые кости для таких работ, однако им не так жалко мелкие обломки.

Точное определение возраста ископаемых останков, связанных с находками материальной культуры, особенно интересно в случае Денисовой пещеры и других мест, где, как нам известно, в прошлом обитали разные виды человека. Некоторые исследователи утверждают, что артефакты, имеющие символическое или декоративное значение, отражают наличие современных когнитивных способностей и уникальны для вида *Homo sapiens*. Другие считают, что неандертальцы и иные виды также

могли делать схожие вещи и даже могли передать часть своих традиций *Homo sapiens*, когда наши виды встретились. Возможность определить вид и возраст ископаемых останков означает, что ученые смогут восстановить последовательность событий, произошедших в этих местах, с невероятной точностью и таким образом прояснить важную главу в первобытной истории человека.

Миссия невыполнима

Российские археологи изучают Денисову пещеру с 1980-х гг. Но только в 2010 г. произошло событие, которое сделало это место центром всеобщего внимания. В том году исследователи из Института эволюционной антропологии Общества Макса Планка в Лейпциге опубликовали результаты генетического анализа кости, найденной в 2008 г. в Денисовой пещере российскими археологами Анатолием Деревянко и Михаилом Шуньковым. ДНК, которую ученые смогли извлечь из кусочка фаланги пальца, показала, что кость принадлежит ранее неизвестному виду людей, который был настолько же родственен неандертальцу, насколько и мы. Фаланга принадлежала маленькой девочке, получившей имя «женщина X», она оказалась представителем вида, который ученые теперь называют «денисовский человек», или «денисовец». После этого в пещере нашли еще несколько костей и зубов, принадлежащих как денисовцам, так и неандертальцам.

Открытие в Денисовой пещере показывает, насколько важную информацию можно извлечь из ископаемых останков с помощью современных генетических методов. Они могут рассказать нам не только о наличии ранее неизвестного вида, но и о том, как он взаимодействовал с нашим



Исследователи осматривают археологические отложения в Денисовой пещере, прежде чем взять образцы для ЗооМС и радиоуглеродного анализа

ОБ АВТОРАХ

Катерина Дука (Katerina Douka) — археолог из Института изучения истории человечества Общества Макса Планка в Йене. Она возглавляет группу, разыскивающую среди найденных в Азии неидентифицированных фрагментов костей те, которые принадлежали неандертальцам и денисовским людям.

Томас Хайем (Thomas Higham) — руководитель отделения радиоуглеродного анализа Оксфордского университета. Он занимается определением возраста костей, найденных при археологических раскопках на территории Евразии и относящихся к среднему и верхнему палеолиту.



видом. Например, благодаря генетическому анализу мы знаем, что неандертальцы и люди современного типа скрещивались по меньшей мере трижды за последние 100 тыс. лет и что неандертальцы и денисовцы, а также денисовцы и люди современного типа тоже скрещивались друг с другом. В итоге устоявшиеся к тому времени представления, что *Homo sapiens* вышел из Африки и в мгновение ока просто стер с лица земли популяции архаичных людей, уступили место более сложному сценарию, включающему скрещивание и поток генов между этими группами. Такая модель происхождения современного человека называется «замещение с протечкой». Однако большинство ископаемых костей, найденных в Денисовой пещере, настолько фрагментарны, что мы не можем разобраться, какие из них принадлежат людям.

Мы присоединились к денисовскому проекту шесть лет назад, поскольку хорошо разбираемся в хронологии, особенно в использовании метода радиоуглеродного анализа для определения временных периодов в археологических раскопках. Для образцов, относящихся к среднему (250–40 тыс. лет назад) и верхнему (40–10 тыс. лет назад) палеолиту, такая датировка особенно важна, поскольку часто в местах раскопок не находят каменных орудий, по которым можно точно определить период. Мы работаем, чтобы обеспечить надежную датировку для находок в Денисовой пещере и на других палеолитических стоянках Евразии.

Наша группа прибыла на место раскопок в 2014 г. и на встрече команды ученых, работавших с Денисовой пещерой, предложила идею, которая должна была помочь получить более точную картину взаимодействия нашего вида, неандертальцев и денисовцев. Было очевидно, что все найденные останки людей в Денисовой пещере совсем небольшие, от 3 до 5 см длиной. Например, фаланга «женщины X» была размером с чечевичное зерно и весила всего 40 мг. Большинство найденных костей были сильно разрушены, главным образом хищниками, такими как гиены, которые жили в этой пещере, заводили детенышей и грызли там кости. Начиная с 2008 г. из Денисовой пещеры было

извлечено более 135 тыс. костей, но 95% из них настолько фрагментарны, что не удавалось определить их видовую принадлежность. С другой стороны, сохранность биомолекул, и в том числе ДНК, в этих костях потрясающая. Два самых полных генома древних людей восстановлены именно из костей, найденных в этой пещере. Мы задумались, есть ли способ на месте проверить тысячи костных фрагментов, чтобы найти принадлежащие людям. Если бы мы смогли это сделать, то, возможно, получили бы новые генетические и хронологические данные или даже открыли бы новый вид людей, обитавших в пещере. Именно тогда мы поняли, что для этой цели можно использовать ЗооМС.

Метод ЗооМС, называемый также идентификацией белка коллагена методом отпечатков пептидных масс, позволяет исследователям определять систематическое положение животного по фрагменту кости с помощью анализа белков костной ткани. Белок кости коллаген состоит из сотни небольших частей, которые называются пептидами, а их состав немного различается у животных разных групп. Сравнивая пептиды в неизвестном костном фрагменте с такими же у известных животных, можно правильно определить семейство, род и иногда даже вид животного. ЗооМС, впервые предложенный англичанами Майклом Бакли (Michael Buckley), сейчас работающим в Манчестерском университете, и Мэттью Коллинзом (Matthew Collins) из Йоркского университета, уже более десяти лет использовался для идентификации костей животных, найденных в археологических раскопках. Метод относительно дешевый (\$5–10 за образец) и требует минимального повреждения образца: для анализа достаточно всего 10–20 мг кости. Кроме того, он быстр: за неделю один человек может проверить сотни фрагментов костей.

Насколько нам известно, никто раньше не использовал ЗооМС для поиска человеческих костей. Но мы пришли к выводу, что у нас есть все шансы. Мы решили, что можно использовать даже маленькие фрагменты кости, поскольку в Денисовой пещере очень низкая и стабильная температура и там прекрасно сохраняются ДНК и коллаген из костей. Мы знали, что не сможем определить

Чья это кость?

С помощью ЗооМС исследователи могут определить, к какой таксономической группе относится фрагмент кости. ЗооМС анализирует сохранившийся в костях белок коллаген. Фермент разрезает коллаген на пептидные цепочки. С помощью лазера пептидам придают электрический заряд, а затем они движутся в сторону детектора, регистрирующего момент попадания на него пептида. В результате получается спектр значений, своеобразный «отпечаток пальца», который можно сравнить с базой данных, содержащей такие коллагеновые «отпечатки» животных разных видов, и определить, кому принадлежала загадочная кость.

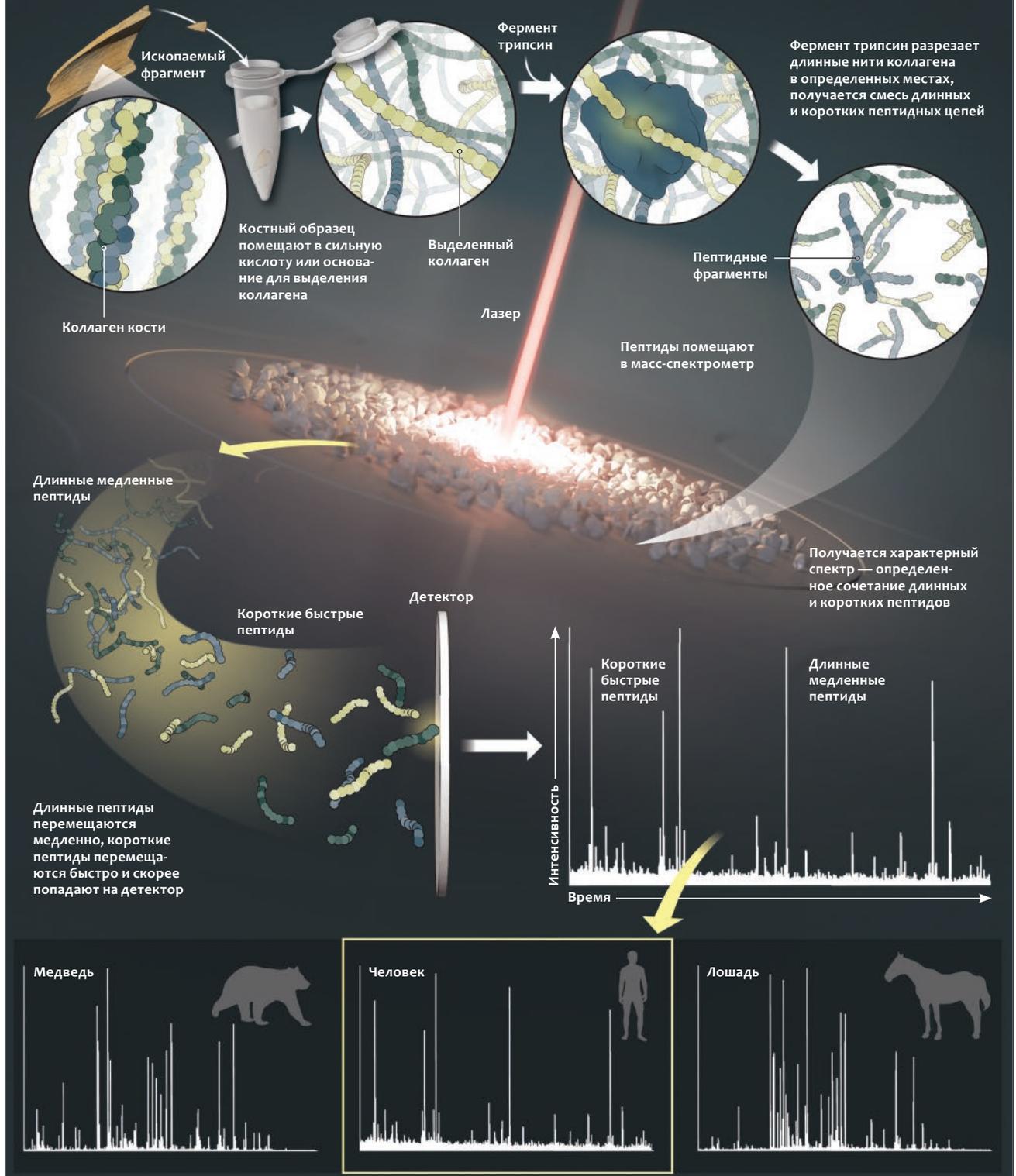


Illustration by Falconeri Visuals



Для анализа ископаемых фрагментов с помощью ЗооМС нужно отпилить образец весом 20 мг от каждого маленького кусочка (1). Другие образцы берут для радиоуглеродного определения возраста (2).

с помощью ЗооМС вид животного. Коллагеновые пептиды у человека и человекообразных обезьян схожи настолько, что мы их не различим. Однако в палеолите никаких человекообразных обезьян в этой части мира не бродило. Так что если мы можем определить, что фрагмент кости принадлежит группе гоминидов, объединяющей человека и человекообразных обезьян, то мы можем утверждать, что имеем дело с каким-то видом человека, и направить образец на генетический анализ, чтобы определить его вид.

На той встрече в Денисовой пещере в 2014 г. был и крупнейший специалист по древней ДНК Сванте Паабо (Svante Pääbo) из Института эволюционной антропологии Общества Макса Планка, руководитель проекта по изучению генома неандертальца. В 2010 г. его группа опубликовала исследование генома денисовского человека. Мы не пересекались по работе ранее, и нам хотелось узнать, что он думает о наших идеях обследования фрагментов костей и будет ли ему интересно сотрудничество в данном проекте. Он воспользовался этой возможностью и сразу же нас поддержал. Затем мы обсудили план с Анатолием Деревянко из Российской академии наук и руководителем раскопок Михаилом Шуньковым. Они тоже заинтересовались. Позже

в том же году мы взяли пробы из нескольких тысяч «беспольных» во всех отношениях фрагментов костей, которые были недавно найдены в этом месте.

В теории казалось, что все можно сделать быстро. Однако на практике это была огромная кропотливая работа по извлечению крошечных фрагментов для анализа из каждого осколка кости так, чтобы потенциально ценные образцы не соприкасались с чем-нибудь, что может их загрязнить. Большую часть работы выполнила наша студентка Саманта Браун (Samantha Brown) в рамках своей магистерской диссертации, проводя долгие часы в лаборатории в Оксфордском университете.

В этом проекте мы сотрудничали с Бакли. Когда мы набрали 700–800 образцов кости, Браун отправилась к нему в лабораторию, чтобы их обработать и проанализировать. Результаты оказались интересными: нам попались мамонты, гиены, лошади, северные олени, шерстистые носороги — полный спектр животных ледникового периода, но, к сожалению, пептидов, характерных для гоминидов, там не было. Мы расстроились, но решили проверить вторую партию, чтобы посмотреть, удастся ли нам найти хотя бы одну человеческую кость во всей этой массе обломков. Мы думали, что шансов немного, но продолжали надеяться.

Однажды летним вечером 2015 г. мы получили электронное письмо от Бакли. Он обнаружил, что в одном из наших образцов, DC1227, были пептидные маркеры, характерные для гоминидов. У нас был фрагмент человеческой кости — это как найти иголку в стоге сена! Мы были в восторге, казалось, что наша безумная идея привела к успеху.

На следующий день рано утром мы отправились в нашу оксфордскую лабораторию, чтобы найти среди архивных образцов эту кость. Мы несколько смутились, увидев, что найденная кость была малюсенькой даже по денисовским меркам — всего 25 мм длиной, так что для исследований было маловато материала. Но учитывая исключительную биомолекулярную сохранность находок в Денисовой пещере, мы понадеялись, что этого хватит для тех методов, которые мы хотели использовать, чтобы узнать как можно больше о кости. Мы сфотографировали ее с высоким разрешением, сделали компьютерную томографию и взяли дополнительные образцы для определения возраста и проведения изотопного анализа, а затем Браун отвезла кость в Лейпциг, чтобы сделать анализ ДНК в лаборатории Паабо.

Через несколько недель мы получили результаты определения возраста. Отсутствие радиоактивного углерода в образце означало, что нашей маленькой косточке больше 50 тыс. лет. И вскоре мы узнали от Паабо, что митохондриальная ДНК, которая в клетке находится в вырабатывающих энергию органеллах и передается детям от матери, свидетельствует о том, что мать этого человека была неандертальцем. Среди тысяч «мусорных» костей мы нашли фрагмент кости человека и доказали, что наш подход работает. Сотрудники Паабо планировали получить значительно больше информации из ядерного генома кости, которую теперь называли в честь места находки *Denisova 11*. Мы тем временем решили проверить наш подход в другом месте.

Мы и они

Пещера Виндия в Хорватии — важнейшее место для изучения поздних неандертальцев в Европе. Долгие годы на основе радиоуглеродных данных считалось, что неандертальцы могли жить здесь 30 тыс. лет назад, а значит, был период, когда их присутствие перекрывалось с присутствием анатомически современных людей, которые появились в этом районе 42–45 тыс. лет назад. Такое длительное сосуществование позволяло предполагать, что неандертальцы были не вытеснены, а ассимилированы современными людьми. Проводя повторную оценку возраста находок в Виндии, мы решили, что было бы интересно использовать ЗооМС для проверки неопознанных костей в этом месте. В предыдущем исследовании более целых

костей из Виндии выяснилось, что среди находок преобладают кости пещерного медведя, они составляют около 80%, поэтому мы не ожидали найти такое же разнообразие фауны, как выявленное в Денисовой пещере. За проект взялась Кара Кубьяк (Cara Kubiak), которая тогда была нашей студенткой. Из 383 проанализированных образцов в 28-м внезапно обнаружилась характерная для гоминидов пептидная последовательность. Позже сотрудники Паабо с помощью генетических методов подтвердили, что это неандерталец. Кость была длиной примерно 7 см, и, что интересно, на ней были следы порезов и другие признаки воздействия человека. На костях неандертальцев иногда встречаются такие отметины, что можно считать веским доказательством убийства и каннибализма.

Данный образец, названный Vi*28, оказался ключевым для нашей работы по определению хронологии событий. Так сложилось исторически, что

Найденная кость принадлежала не неандертальцу, у этого человека были неандертальская мама и папа денисовец

археологи, чтобы сохранить кости из Виндии, обрабатывали их консервантами. Это значительно затрудняло датировку, поскольку из консервантов углерод попадал в кости. К счастью для нас, Vi*28 в отличие от других человеческих костей консервантами не обрабатывали, поскольку считали, что это кость животного. Радиоуглеродная датировка показала, что Vi*28 принадлежала неандертальцу, жившему более 47 тыс. лет назад. Это открытие, опубликованное в 2017 г. вместе с данными, которые мы получили по другим неандертальцам, свидетельствует о том, что неандертальцы исчезли из Виндии более 40 тыс. лет назад, прежде чем современные люди появились в этих краях. Предыдущие датировки, показывавшие присутствие неандертальцев 30 тыс. лет назад, были ошибкой, полученной из-за загрязнения углеродом, который не был эффективно удален. ЗооМС снова доказала свою полезность.

С помощью данного метода добились успеха и другие группы исследователей. В 2016 г. Фридо Уэлкер (Frido Welker), который сейчас работает в Музее естественной истории в Дании, с коллегами сообщили, что они использовали ЗооМС для идентификации 28 ранее не опознанных останков гоминидов среди осколков костей в знаменитой пещере Грот-дю-Рен в Бургундии во Франции. Несколько десятков лет назад работавшие здесь исследователи нашли неандертальские кости в сочетании со множеством удивительно сложных изделий, таких как костяные орудия,

подвески и другие украшения, — элементами так называемой шательперонской культуры, которая считается переходной между средним и верхним палеолитом. Это открытие противоречило устоявшимся представлениям, что на такую изобретательность способен только *H. sapiens*. Поэтому возникла продолжительная дискуссия о том, действительно ли неандертальцы имели отношение к этим продвинутым изделиям или же археологические слои здесь каким-то образом перемешались, так что кости неандертальцев оказались рядом с более поздними изделиями, принадлежавшими *H. sapiens*.

Те 28 фрагментов костей, которые Уэлкер с коллегами с помощью ЗооМС идентифицировали как человеческие, точно были из одного слоя с орудиями и украшениями. Было проведено секвенирование, и результаты получились однозначными: кости принадлежали неандертальцам, а не *H. sapiens*. Исследование убедительно подтвердило, что неандертальцы действительно владели шательперонской и другими переходными культурами и были умнее, чем обычно принято считать.

Гибридный ребенок

Все время, пока мы работали в Виндии, мы продолжали анализировать образцы из Денисовой пещеры, надеясь добавить еще человеческих образцов в нашу коллекцию. Усилия увенчались успехом — еще двумя костями гомининов: *DC3573*, которая, как оказалось, принадлежала неандертальцу, жившему более 50 тыс. лет назад, и *DC3758* возрастом 40 тыс. лет, в которой к сожалению, не сохранилось древней ДНК. Среди более 5 тыс. осколков костей мы нашли в общей сложности пять человеческих образцов, которые никогда бы не были обнаружены, если бы не ЗооМС.

Но самое интересное было еще впереди. В мае 2017 г. в Институте эволюционной антропологии Общества Макса Планка мы встретились со старшими сотрудниками лаборатории Паабо, и в том числе с Маттиасом Мейером (Matthias Meyer) и Джанет Келсо (Janet Kelso). Мы хотели узнать о результатах исследования образца *Denisova 11* — удалось ли выделить ядерную ДНК, по которой можно было бы получить гораздо более подробную информацию о том, кем был обладатель этой кости.

Не так часто в науке случается получить совершенно потрясающие новости, но Мейеру и Келсо это удалось. Они рассказали, что ядерная ДНК оказалась необычной: одна половина ее была характерной для неандертальцев, а другая, казалось, была унаследована от денисовца. Они предположили, что *Denisova 11* была гибридом 50 на 50. Чтобы исключить возможность ошибки, исследователи вновь запустили процесс идентификации для перепроверки результата. Через несколько месяцев были получены данные, окончательно

подтвердившие исходное предположение. Митохондриальная ДНК показывала нам лишь половину картины. Найденная кость принадлежала не неандертальцу, у этого человека были неандертальская мама и папа денисовец, на языке генетиков — гибрид первого поколения. Исследователи опубликовали это поразительное открытие 6 сентября в журнале *Nature* в статье, где первым автором была Вивиан Слон (Viviane Slon) из Института эволюционной антропологии Общества Макса Планка.

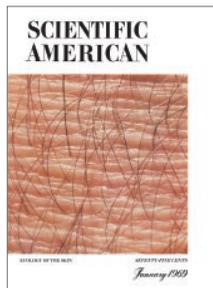
Теперь благодаря ДНК мы знали, что *Denisova 11* была женщиной, жившей приблизительно 90–100 тыс. лет назад. А с помощью анализа плотности костной ткани, проведенного на основе сделанной нами КТ, наш коллега Бенс Вайола (Bence Viola) из Торонтского университета приблизительно определил, что на момент смерти ей было 13 лет. В свою очередь, у ее отца денисовца несколько сотен поколений назад был предок неандерталец. Конечно, мы никогда не узнаем, как в доисторические времена возникали такие союзы, нам известно только, что они были. Мы также никогда не сможем узнать, как умерла *Denisova 11*, понятно лишь, что ее останки, по-видимому, попали в пещеру благодаря хищнику, вероятно, гиене.

Мы никогда не узнаем, обглаживала ли ее гиена после того, как девочка умерла и была ритуально похоронена, или же она погибла от зубов хищника. На протяжении десятков тысячелетий маленький кусочек ее тела лежал непотревоженный в пещере и, возможно, оставался бы там еще много лет, если бы не современная наука, позволившая нам вдохнуть жизнь в эту историю. Мы надеемся, что с помощью ЗооМС раскроем еще много секретов, хранящихся в костях. ■

Перевод: М.С. Багоцкая

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Вонг К. Последний из гомининов // ВМН, № 11, 2018.
- Identification of a New Hominin Bone from Denisova Cave, Siberia Using Collagen Fingerprinting and Mitochondrial DNA Analysis. Samantha Brown et al. in *Scientific Reports*, Vol. 6, Article No. 23559; March 29, 2016.
- Palaeoproteomic Evidence Identifies Archaic Hominins Associated with the Châtelperronian at the Grotte du Renne. Frido Welker et al. in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 113, No. 40, pages 11,162–11,167; October 4, 2016.
- Direct Dating of Neanderthal Remains from the Site of Vindija Cave and Implications for the Middle to Upper Paleolithic Transition. Thibaut Devièse et al. in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 114, No. 40, pages 10,606–10,611; October 3, 2017.
- The Genome of the Offspring of a Neanderthal Mother and a Denisovan Father. Viviane Slon et al. in *Nature*, Vol. 561, pages 113–116; September 6, 2018.



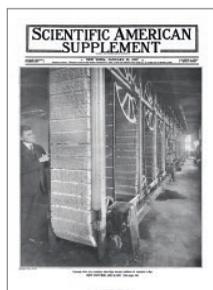
ЯНВАРЬ 1969

Проблема абортов. Аборт — в современном мире все еще самый распространенный и самый криминальный способ контроля рождаемости. В последние годы в нескольких странах данная практика была легализована, вследствие этого искусственный аборт вышел из тени и стал одной из тем дискуссий в мире.

Предмет споров касается широкого спектра вопросов: морально-этических, медицинских, социальных, экономических, правовых, политических. Опыт стран, которые легализовали аборты, представляет большой объем достоверных данных, с помощью которых можно оценить все за и против этой практики. В США аборты были признаны преступлением по статутному праву только с 1930 г. Сегодня они все еще под запретом в большинстве штатов, исключение составляют случаи серьезной угрозы жизни матери.

Танец твердых тел

«Все знают: мир из Атомов построен, —
Но был не прост познанья долгий путь, —
Сперва алхимики прошли неровным строем,
Пытаясь вглубь Металлов заглянуть,
Чтоб в Золото расправить Соль и Ртуть;
А непокорный вековым канонам,
Лавуазье покончил с Флогистоном
И дал дорогу Газовым Законам,
Раскрыв реакций истинную суть».
Джон Апдайк (перевод Н.А. Воронель).
Оригинальное стихотворение из 11 строф Апдайка было навеяно тематическим выпуском журнала *Scientific American* «Материалы» (сентябрь 1967 г.).



ЯНВАРЬ 1919

Воздушные суда и огонь.

К разжалованию дирижаблей как инструмента войны привели не аэропланы, а неоправданно высокий риск, связанный с использованием водорода. Гелий, инертный негорючий газ, — самый легкий после водорода, и его относитель-

но много во всех минералах, содержащих радий, торий или уран, но операция по выделению гелия из этих минералов требует больших затрат (от \$1,5 тыс. до \$6 тыс. за 0,03 м³), поэтому вопрос об использовании его вместо водорода никогда серьезно и не рассматривался. К следующей весне гелий будет производиться в нашей стране по себестоимости примерно \$100 за 3 м³, и масштаб достижения будет полностью реализован.

Примечание: Законом о контроле над гелием (1927) экспорт этого газа был приостановлен; иностранные компании, такие как *Luftschiffbau Zeppelin*, должны были использовать огнеопасный водород.



ЯНВАРЬ 1869

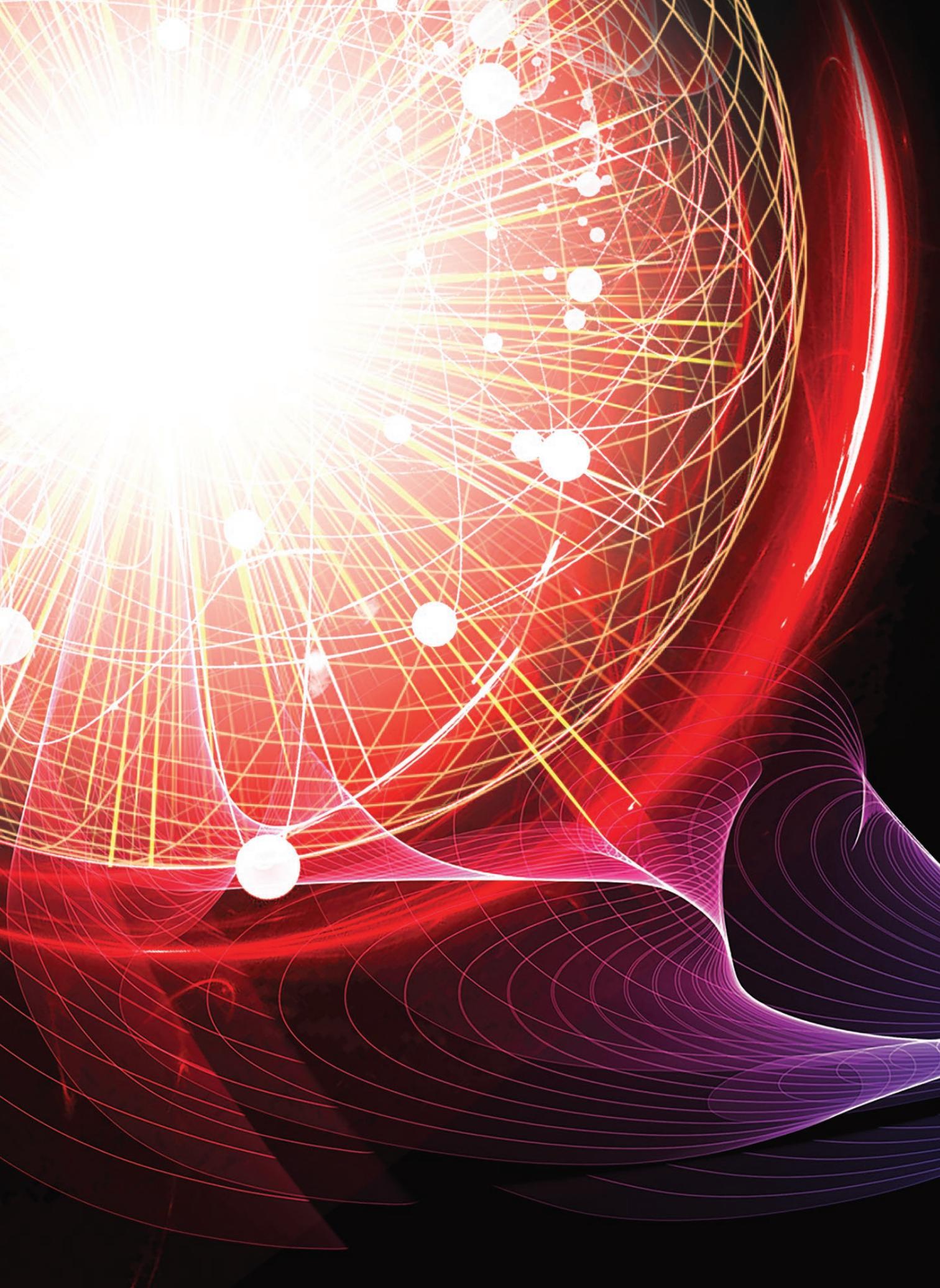
Ловля сельди. Доктор Луис Фейхтвангер недавно вернулся из путешествия в Мэн и прислал нам несколько фактов в отношении ловли сельди. Он говорит, что этот сезон оказался самым богатым за многие годы. 12 октября 80 хогсхедов (бочек объемом 238 л) сельди были подняты на борт за один улов и еще 30 за два дня до этого. Каждые две такие бочки дают один баррель рыбьего жира, который стоит на рынке \$22,50 за баррель, он используется для выделки кожи и заправки другой рыбы, а также в качестве смазочного масла. Кроме этого продукта остатки от переработки 5 хогсхедов сельди дают тун (бочка объемом 954 л) рыбного гуано, лучшего из известных удобрений, которое стоит \$20 за тун.

Кроличья напасть. Кролики, завезенные некогда в Австралию из Англии, угрожают сегодня стать чумой масштаба казней египетских на удаленных и малонаселенных равнинах. Всего лишь год-два назад кроликов считали безобидными. Теперь, когда бедствие разрослось до таких масштабов, мы все, конечно, можем говорить, что никто этого не предвидел. В Англии у диких кроликов множество врагов; здесь же их почти нет.

Поддельный виски. Газета *New York World* провела проверку качества алкогольных напитков в различных барах города. Было исследовано большое количество образцов бренди, продаваемого по цене 30–50 центов за рюмку, а также виски по 20–30 центов за рюмку — и обнаружено только два настоящих. Если такое происходит с алкоголем в лучших заведениях, какое же пойло подносят в дешевых кабаках, где рюмку виски можно купить за 5–10 центов? ■



Легкий танк Renault FT со снятым вооружением используется после окончания войны в качестве тягача — крайне неэффективная, но, вероятно, необходимая мера, поскольку в ходе войны было убито много лошадей, 1919 г.



ОБ АВТОРАХ

Рональд Хансон (Ronald Hanson) — физик из Делфтского технического университета и научный руководитель исследовательского центра *Qitech*, созданного совместно с Нидерландской организацией прикладных научных исследований (*TNO*), работа которого сфокусирована на квантовых вычислениях и квантовой интернет-технологии.



Кристер Шальм (Krister Shalm) — физик из Национального института стандартов и техники и Колорадского университета в Боулдере, где он разрабатывает инструменты для проверки фундаментальных проблем квантовой механики.



Не все революции начинаются с больших потрясений. В случае квантовой механики такая тихая революция началась в 1964 г., когда физик Джон Белл (John Bell) опубликовал уравнение. На основе этого уравнения в форме математического неравенства был предложен тест с целью проверки глубинных философских вопросов, которые не давали покоя первооткрывателям квантовой механики.

Проблема была следующая: могут ли частицы, отделенные друг от друга огромными расстояниями, сохранять связь так, что измерение, выполненное над одной из них, влияет на вторую. Согласно классической физике, этого быть не может. Но в рамках квантовой теории это происходит постоянно. Используя свое уравнение, Белл предложил способ определить, действительно ли Вселенная настолько странна.

За прошедшую половину столетия его простое уравнение основательно изменило наше представление о квантовой теории. Многие из квантовых технологий, которые сегодня изобретают физики, обязаны своим появлением тесту Белла. Но только

лишь в 2015 г., спустя более 50 лет после того, как Белл предложил свое неравенство, ученые смогли проверить предсказания теоремы Белла наиболее полным из возможных способов. Эти эксперименты завершают поиски, которые вели несколько поколений ученых, и знаменуют собой начало новой эры в развитии квантовых технологий.

Скрытые переменные

Чтобы понять уравнение Белла, мы должны вернуться к корням квантовой механики. Этот набор правил описывает поведение света и вещества на микроуровне. Атомы, электроны, фотоны и другие субатомные частицы ведут себя абсолютно не так, как то, что мы наблюдаем в нашей повседневной жизни. Одно из главных отличий состоит в том, что эти крохотные частицы существуют в неопределенных состояниях. Взять, например, спин электрона. Если электрон, спин которого направлен вбок, проходит через магнитное поле, ориентированное вверх и вниз, то половину времени он будет смотреть вверх, а другую половину — вниз, но конечное состояние будет принципиально случайным. Сравните это с подбрасыванием монеты. Мы могли бы подумать, что результат подбрасывания монеты — такое же случайное событие, но если бы мы точно знали массу монеты, направление и величину силы, с которой мы ее подбросили, а также все детали воздействия на нее воздушных потоков, мы смогли бы точно

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- В 1964 г. физик Джон Белл обнаружил, что явление квантового перепутывания — когда две частицы могут сохранять «призрачную» связь, даже находясь далеко друг от друга, — приводит к математическому конфликту с нашей интуитивной картиной природы.
- Со времени предложения Белла экспериментаторы опробовали много версий его теста. Большинство результатов, по-видимому, говорят в пользу существования квантового перепутывания. Однако в каждом из этих экспериментов присутствовали лазейки, открывающие возможность того, что где-то за сценой действуют «скрытые параметры», которые дают результат, маскирующийся под квантовую перепутанность.
- Наконец в 2015 г. несколько научных групп провели первые тесты Белла, в которых все лазейки были закрыты и которые исключили любое объяснение с помощью локальных скрытых переменных.

предсказать, на какую сторону монета приземлится. Однако спин электрона ведет себя совсем не так. Даже если бы мы обладали исчерпывающими сведениями обо всех свойствах электрона и его спина до того, как он пройдет через магнитное поле, квантовая неопределенность не позволит нам узнать, по какому пути он пойдет (но мы можем вычислить вероятность того, что спин его будет направлен вверх или вниз). Хотя когда ученые фактически измеряют квантовую систему, все эти возможности каким-то образом перестают существовать и единственный результат определен: у электрона в результате спин ориентирован в конкретном направлении либо вверх, либо вниз.

Когда в начале XX столетия физики формулировали квантовую теорию, некоторые из ее основоположников, такие как Альберт Эйнштейн и Эрвин Шредингер, чувствовали себя некомфортно из-за неопределенности квантовых свойств. Возможно, полагали они, в природе на самом деле нет неопределенностей и теория, которая придет на смену квантовой механике, вероятно, точно предскажет поведение частиц. Тогда станет возможным предвидеть результат измерения спина электрона аналогично тому, как возможно точно знать, на какую сторону упадет монета, если у тебя есть достаточно информации.

Шредингер ввел в научный оборот идею о квантовом перепутывании (нем. *Verschränkung*), чтобы описать квантовую неопределенность, связывающую две частицы или более. Согласно квантовой теории, свойства частиц могут быть квантово перепутаны таким образом, что их совместное значение точно известно, а значения для каждой из них остаются полностью неопределенными. В качестве аналогии можно представить две игральные кости, на каждой из которых при броске выпадает случайный результат, но сумма их всегда составляет 7. Шредингер использовал идею квантового перепутывания в знаменитом мысленном эксперименте, в котором неопределенность состояния атома оказывается квантово перепутанной с тем, жив или мертв кот. Безусловно, любой кот либо мертв, либо жив, а не находится в каком-то абсурдном промежуточном состоянии, рассуждал Шредингер, следовательно, мы должны поставить под вопрос идею, что атомы вообще могут иметь неопределенные свойства.

Эйнштейн совместно с Борисом Подольским и Натаном Розеном (все вместе известны как ЭПР) продолжили эксперимент еще на один шаг, проанализировав два квантово перепутанных электрона, находящихся далеко друг от друга. Представьте, что спины частиц квантово перепутаны таким образом, что при измерении вдоль одного и того же направления значения их всегда будут противоположны. Например, если ученые измеряют спин одного из электронов и обнаруживают, что

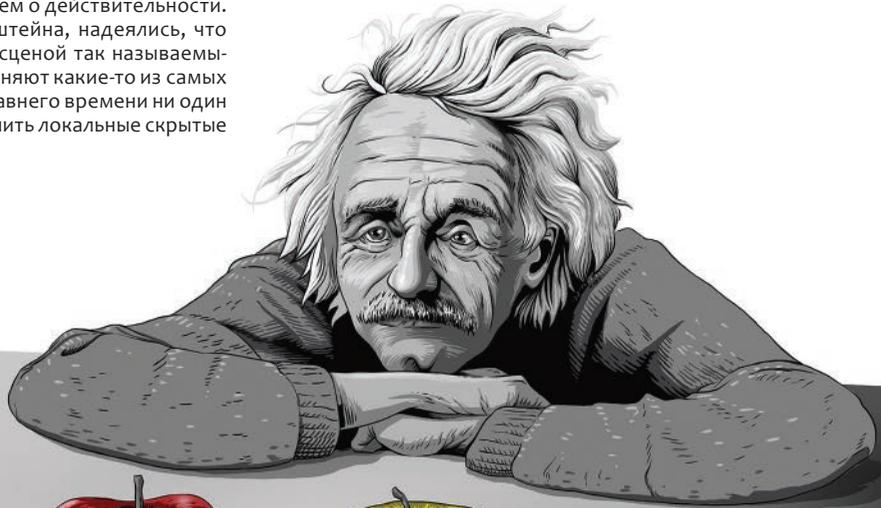
он направлен вверх, у другого он будет смотреть вниз. Такие корреляции, безусловно, удивительны, когда электроны находятся достаточно далеко друг от друга, так, что они не могут связаться друг с другом со скоростью света прежде, чем спины каждого из них будут измерены. Каким образом все-таки вторая частица узнает, что спин первой направлен вверх? Эйнштейн, как хорошо известно, назвал эту синхронизацию «призрачным дальним воздействием».

Анализ Эйнштейном, Подольским и Розеном этого примера, опубликованный в 1935 г. в ставшей классической статье, начинался с двух весьма разумных предположений. Во-первых, если ученые могут предсказать результат измерения с определенностью, в природе должно существовать какое-то свойство, которое соответствует этому результату. Эйнштейн назвал эти свойства «элементами действительности». Например, если мы знаем, что спин электрона направлен вверх, мы можем предсказать вполне определенно, что если он летит через соответствующее магнитное поле, то всегда будет отклоняться вверх. В этой ситуации спин электрона был бы элементом действительности, поскольку четко определен и никакой неопределенности нет. Во-вторых, событие в одном месте не может мгновенно повлиять на удаленное событие; воздействие не может распространяться быстрее скорости света.

Приняв эти допущения, давайте проанализируем два квантово перепутанных электрона, находящихся в двух удаленных друг от друга местах, у двух людей, Алисы и Боба. Предположим, что Алиса измеряет спин электрона относительно оси Z . Из-за строгой антикорреляции она сразу же узнает, какой результат будет, если Боб тоже измерит спин электрона относительно оси Z . Согласно ЭПР, Z -компонента спина электрона Боба тоже будет элементом действительности. Аналогично, если Алиса решит измерить спин относительно оси X , она будет знать с определенностью результат измерения спина электрона Боба относительно оси X . В этом случае X -компонента спина электрона Боба будет элементом действительности. Но поскольку Алиса и Боб находятся далеко друг от друга, решение Алисы измерить спин относительно оси Z или X не может повлиять на то, что происходит у Боба. Следовательно, чтобы объяснить строгую антикорреляцию, предсказанную квантовой механикой, значение спина электрона Боба должно быть строго предсказуемо относительно как оси Z , так и оси X . Это, очевидно, противоречит квантовой теории, которая утверждает, что, согласно так называемому принципу неопределенности Гейзенберга, спин может иметь строго определенное значение относительно одного-единственного направления и неопределенные относительно всех прочих.

Как закрыть все лазейки

Квантовая механика предлагает картину Вселенной, резко конфликтующую с нашим интуитивным представлением о действительности. Некоторые ученые, включая Альберта Эйнштейна, надеялись, что альтернативные теории с действующими за сценой так называемыми скрытыми параметрами, возможно, объясняют какие-то из самых странных выводов квантовой теории. До недавнего времени ни один из экспериментов не мог убедительно исключить локальные скрытые параметры, но в 2015 г. все изменилось.

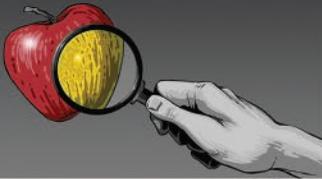


Несогласие Эйнштейна с квантовой теорией основывалось на двух принципах: реалистичность и локальность.

Реалистичность — идея, что объекты имеют определенные свойства: яблоко, например, красное или желтое.
Локальность — идея, что на объект влиять может только то, что находится в его окружении; воздействие не может передаваться быстрее, чем свет.



Однако квантовая механика предполагает, что действительность намного причудливее.



Согласно квантовой механике, частица может находиться в двух состояниях одновременно.

Например, квантовое яблоко...



... может быть не красным или...



... желтым...



... а суперпозицией того и другого.

Частицы могут даже быть квантово перепутанными друг с другом. То есть если вы бросаете взгляд на одно яблоко и видите, что оно красное, то другое мгновенно становится желтым.



Квантовое перепутывание существует независимо от расстояния между частицами.

Эйнштейн отказывался принять эту концепцию, назвав ее «призрачным дальним действием». Он заявлял, что, должно быть, существуют локальные скрытые параметры, неизвестные наблюдателю, которые управляют этим квантовым перепутыванием, поскольку в противном случае воздействие должно передаваться быстрее света.



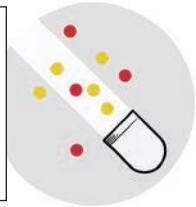


В 1964 г. Джон Белл открыл, что квантовая теория конфликтует с любой из теорий, использующей скрытые параметры. Он придумал способ проверить, действительно ли локальные скрытые параметры могут объяснить наблюдаемое «призрачное дальнодействие».

Тест Белла. Два наблюдателя проводят независимые измерения двух предположительно квантово перепутанных частиц. Белл вычислил максимальную корреляцию, которая должна наблюдаться между результатами двух наблюдателей, если работают локальные скрытые переменные, ограниченные скоростью света.



Экспериментаторы вскоре принялись за работу, проводя этот тест. Но две лазерные станции представили скрытым параметрам некоторую отсрочку.



1. Лазейка локальности
Измерительные станции расположены достаточно близко, что позволяет частицам во время теста поддерживать связь со скоростью меньше, чем скорость света.

2. Лазейка детектирования
Детекторы позволяли измерять лишь часть квантово перепутанных частиц, а не их все.

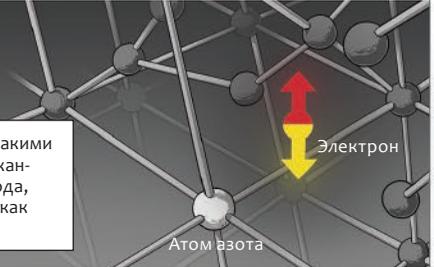
В 2015 г. группа ученых разработала несколько вариантов теста Белла, в которых обе лазейки были закрыты.

Один из них, в Делфтском техническом университете, начинается с двух крошечных бриллиантов.



В почти идеальной решетке атомов углерода существуют дефекты — случайные включения атома азота.

В некоторых местах рядом с такими атомами азота существует вакансия, не занятая атомом углерода, «дефект», который действует как ловушка для электронов.



Направленность спина электрона

Вверх Вниз



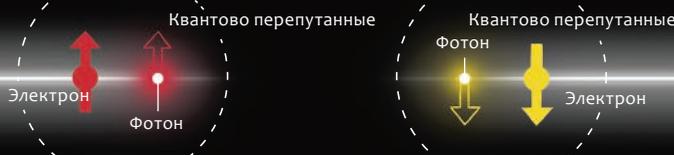
Или в суперпозиции (одновременно направлен и вверх, и вниз).

Используя два электрона в двух кристаллах алмаза, разнесенных на расстоянии 1280 м, ученые могут быть уверены, что нет времени для их связи друг с другом даже со скоростью света в течение промежутка, необходимого для определения параметров измерения и спина электрона.

Лазейка локальности закрыта.



Ученые используют лазеры для перевода электронов в возбужденное состояние, которые затем испускают фотоны, квантово перепутанные со спинами электронов.



Эти фотоны летят через университетский городок до тех пор, пока не встретят друг друга в фотодетекторах.

При встрече фотоны становятся квантово перепутанными. Таким же образом их соответствующие удаленные электроны — которые легче обнаружить и измерить, чем фотоны, — тоже становятся квантово перепутанными.



Лазейка детектирования закрыта

Первый тест Белла без лазеек.



В Делфте ученые провели 245 сеансов, в которых была квантово перепутана пара электронов, разнесенная на 1280 м. В каждом из сеансов они измерили частицы и обнаружили, что 80% были скоррелированы — значительно больше, чем было бы возможно с участием локальных скрытых параметров. Эксперименты в США, Австрии и Германии показали аналогичные результаты.

Эти результаты дали окончательное доказательство того, что локальные скрытые параметры не могут объяснить последствия квантового перепутывания.

Вселенная решительно странна.



Этот конфликт привел ЭПР к выводу, что квантовая теория неполна. Они предположили, что, возможно, есть шанс разрешить это противоречие, добавив в теорию дополнительные параметры (переменные). Другими словами, вероятно, существует более глубокая теория, которая стоит за квантовой механикой и в которой электроны обладают дополнительными свойствами, описывающими, как они ведут себя при совместном измерении. Возможно, эти дополнительные параметры от нас скрыты, но если бы у нас появился к ним доступ, то мы смогли бы точно предсказать, что случится с электронами. Очевидная неопределенность квантовых частиц — результат нашего неведения. Физики называют любое такое расширение квантовой механики, содержащее эти скрытые параметры, «теорией локальных скрытых параметров». Определение «локальный» здесь относится к скрытым сигналам, которые не могут распространяться быстрее скорости света.

Уловка Белла

Эйнштейн не ставил под сомнение предсказания самой квантовой механики; он скорее считал, что существует более глубокая истина в форме скрытых параметров, которые управляют действительностью. После статьи ЭПР 1935 г. интерес к этим основополагающим вопросам квантовой механики угас. Возможность существования скрытых параметров рассматривалась чисто с философской точки зрения, как не имеющая практической ценности, — предсказания теорий, в которых скрытые параметры имелись, и тех, где их не было, оказались идентичными. Но все изменилось в 1964 г., когда Белл потрясающим образом показал, что при определенных обстоятельствах теории со скрытыми параметрами и квантовая механика предсказывают разные вещи. Это открытие означало, что можно экспериментально проверить, действительно ли теории локальных скрытых параметров — а значит, и более глубокая истина природы, на которую надеялся Эйнштейн, — могут существовать.

Белл проанализировал мысленный эксперимент ЭПР, но с небольшой уловкой: он позволил Алисе и Бобу измерять спины электронов относительно любых возможных направлений. В традиционном эксперименте Алиса и Боб должны проводить измерения относительно одного и того же направления, а следовательно, обнаружить, что их результаты на 100% скоррелированы: если Алиса обнаружила, что спин направлен вверх, то Боб всегда получит спин, направленный вниз. Но если Алиса и Боб иногда измеряют относительно различных осей, иногда их результаты не синхронизированы, и именно здесь и появляется разница между квантовой теорией и теориями со скрытыми параметрами. Белл показал, что для определенного

множества направлений корреляция между результатами измерений, полученными Алисой и Бобом, будет сильнее согласно квантовой теории, нежели согласно любой из теорий локальных скрытых параметров, — разница, получившая название «неравенство Белла». Эта разница возникает, поскольку скрытые параметры не могут влиять друг на друга быстрее, чем скорость света, а следовательно, ограничены в том, как они могут координировать свои усилия. Наоборот, квантовая механика позволяет спинам двух электронов существовать совместно в одном квантово перепутанном неопределенном состоянии, которое может растянуться на огромные расстояния. Квантовая перепутанность позволяет квантовой теории предсказывать корреляции, которые могут быть на 40% сильнее.

Теорема Белла полностью изменила мышление физиков. Она показала математический конфликт между эйнштейновской точкой зрения и квантовой теорией и очертила мощный способ для экспериментальной проверки их обеих. Поскольку теорема Белла — это математическое неравенство, которое ограничивает степень корреляции для любой теории локальных скрытых параметров, экспериментальные данные, которые выходят за границы этих ограничений — другими словами, которые «нарушают» неравенство Белла, — покажут, что теории локальных скрытых параметров не могут описать природу.

Вскоре после публикации статьи Белла физики Джон Клаузер (John Clauser), Майкл Хорн (Michael Horne), покойный Абнер Шимони (Abner Shimony) и Ричард Холт (Richard Holt) (группа, получившая название *CHSH*) выявили аналогичные неравенства, которые легче проверить экспериментально. Ученые провели первые опыты в конце 1960-х гг., и с тех пор эксперименты все больше и больше приближались к предложенной Беллом идеальной схеме. В экспериментах была обнаружена корреляция, которая нарушает неравенство Белла и которую, по-видимому, нельзя объяснить теориями локальных скрытых параметров. Тем не менее до 2015 г. во всех опытах обязательно использовались одно или несколько дополнительных допущений из-за несовершенства схемы эксперимента. Эти допущения создавали лазейки, с помощью которых теории локальных скрытых переменных теоретически могли пройти тест.

Практически во всех экспериментах в XX в. ученые генерировали квантово перепутанные фотоны у источника и направляли их на измерительные станции (которые играли роль Алисы и Боба). Каждая из станций, Алиса и Боб, измеряла поляризацию своего фотона — направление, в котором происходят колебания его электрического поля (поляризацию можно рассматривать как спин фотона), — относительно одного из двух

направлений. Затем ученые вычисляли средние значения корреляции между результатами, полученными на этих двух станциях, и вставляли их в уравнение Белла, чтобы проверить, нарушается ли неравенство.

Эксперименты с условиями

В первой серии экспериментов использовалось фиксированное направление измерений. В этом случае есть достаточно времени, чтобы скрытые параметры (если использовать то, что направления, в которых ведутся измерения на каждой из сторон, известны) могли повлиять на результат. То есть скрытые сигналы могли бы рассказать Бобу, какое направление использует Алиса для измерения поляризации своего фотона, без необходимости лететь быстрее света. Эта так называемая лазейка локальности означает, что теория скрытых параметров могла бы соответствовать таким квантовым корреляциям. В 1982 г. французский физик Ален Аспе (Alain Aspect) с сотрудниками выполнил тест: фотоны направлялись в противоположные концы большого помещения, и измерялась их поляризация. Пока фотоны были еще в полете, направление, в котором прибор измерял поляризацию, периодически менялось. В конце 1990-х гг. Антон Цайлингер (Anton Zeilinger), сейчас работающий в Венском университете, и его коллеги еще больше усовершенствовали эту стратегию, используя по-настоящему случайное (непериодическое) изменение направления, в котором измерялась поляризация. Кроме того, эти направления измерений определялись лишь в последний момент перед проведением измерения, поэтому скрытые сигналы должны были передаваться быстрее скорости света, чтобы повлиять на результат эксперимента. Лазейки для локальности были полностью перекрыты.

Однако эти эксперименты имели один недостаток: с фотонами сложно работать. Большую часть времени тесты совсем не давали ответ потому, что [квантово перепутанные] фотоны попросту не образовывались или же терялись по дороге. Экспериментаторы были вынуждены принять допущение, что удачные попытки дают репрезентативное подмножество всего множества попыток («допущение о достоверности выборки»). Если это допущение было отброшено, результаты не нарушали бы неравенство Белла. Возможно, в тех попытках, когда фотоны были утеряны, происходило нечто иное, и если бы их данные были включены, то результат не вступил бы в конфликт с теориями локальных скрытых параметров. Ученые смогли закрыть эту так называемую лазейку обнаружения в нынешнем столетии, отказавшись от фотонов и используя частицы материи, такие как запертые ионы, атомы, сверхпроводящие цепи и ядра в атомах алмаза, все из которых можно связать квантовым

перепутыванием и измерить с высокой точностью. Проблема в том, что в этих случаях частицы были расположены чрезвычайно близко друг к другу, оставляя открытой лазейку для локальности. Таким образом, хотя все тесты Белла были искусны, все их результаты могли быть объяснены, по крайней мере в принципе, теорией локальных скрытых параметров. Тест Белла, в котором все лазейки закрыты одновременно, стал одной из самых грандиозных проблем в квантовой физике.

Благодаря быстрому прогрессу в способности ученых управлять квантовыми системами и измерять их в 2015 г., спустя 80 лет после того, как вышла статья ЭПР, и 51 год после появления уравнения Белла, стало возможным провести эксперимент Белла в идеальных условиях — его часто называют не имеющим лазеек экспериментом Белла. И действительно, прошло немного времени, и четыре различные группы получили результат, свидетельствующий, что неравенство Белла нарушается при всех устраненных лазейках, тем самым дав железное свидетельство против теорий локальных скрытых параметров.

Как закрыть лазейки

Один из нас (Рональд Хансон) и его коллеги провели первый эксперимент с целью закрыть все лазейки в Делфтском техническом университете в Нидерландах, используя схему, которая близко повторяла оригинальную концепцию ЭПР. Мы квантово перепутали спины двух электронов, находящихся внутри кристалла алмаза, в месте, называемом точечным дефектом, там, где должен был располагаться атом углерода, но отсутствует. Два квантово перепутанных электрона находились в различных лабораториях на противоположных сторонах территории университетского городка, и чтобы удостовериться, что между ними никакая связь невозможна, мы использовали быстрый генератор случайных чисел, чтобы задать направление измерения. Это измерение заканчивалось и здесь же записывалось на жесткий диск раньше, чем какая-либо информация об измерении на другой стороне могла прийти со скоростью света. Скрытый сигнал, сообщающий одной измерительной станции, какое направление использовалось для измерения спина на другой, не имел достаточно времени, чтобы пройти из одной лаборатории в другую; таким образом, лазейка для локальности была надежно закрыта.

Такие строгие временные рамки требовали от нас разнести два электрона на расстояние более чем километр, примерно на два порядка величины дальше, чем предыдущее мировое достижение для квантово перепутанных систем частиц материи. Мы добились такого результата, воспользовавшись методом, получившим название «обмен квантовым перепутыванием», при котором мы сначала

квантово перепутываем каждый из электронов с фотоном. Затем мы посылаем фотоны, чтобы те встретились на полпути между двумя лабораториями на полупрозрачном зеркале, на каждой стороне которого мы поместили по детектору. Если мы обнаруживаем фотоны на разных сторонах зеркала, то спины электронов, квантово перепутанных с каждым из фотонов, сами становятся квантово перепутанными. Другими словами, квантовая перепутанность между электронами и фотонами передается двум электронам. Этот процесс предрасположен к ошибкам: фотоны могут потеряться на пути от кристалла алмаза к зеркалу, так же как и в более ранних экспериментах на основе фотонов. Но мы начинали тест Белла, только если оба фотона обнаруживались; таким образом мы заранее решали проблему потери фотонов. Так мы закрывали лазейки обнаружения, поскольку не исключали результатов любой проверки теста Белла из списка наших окончательных результатов. Хотя потеря фотонов из-за большого расстояния в нашем случае не ограничивала качества квантовой перепутанности, она все же сильно лимитировала скорость, с которой мы могли проводить тест Белла, — всего несколько в час.

После безостановочного проведения эксперимента в течение нескольких недель в июне 2015 г. мы обнаружили, что неравенство Белла нарушалось не менее чем в 20% случаев, в полном соответствии с предсказаниями квантовой теории. Вероятность того, что такие результаты могли бы появиться в какой-либо из моделей с локальными скрытыми параметрами, — даже если допустить, что приборы вступили в злонамеренный сговор, используя все имеющиеся данные, — была 0,039. Вторая серия экспериментов, проведенная в декабре 2015 г., показала аналогичное нарушение неравенств Белла.

В том же году три другие группы провели тесты Белла, в которых были устранены все изъяны. В сентябре физики Национального института стандартов и техники (НИСТ) и их коллеги во главе с одним из нас (Кристером Шальмом) использовали квантово перепутанные фотоны, а в этом же месяце группа Цайлингера проделала то же самое. Вскоре после этого Харальд Вайнфуртер (Harald Weinfurter) и его группа из Мюнхенского университета им. Людвига и Максимилиана использовали атомы рубидия, разнесенные на 400 м в схеме, аналогичной схеме группы Хансона (результаты были опубликованы в 2017 г.).

Обе научные группы, НИСТ и венская, квантово перепутали состояния поляризации двух фотонов, используя мощные лазеры для возбуждения специальных кристаллических материалов. Очень редко, примерно один из миллиарда фотонов лазерного излучения, попадающих на кристалл, испытывает трансформацию и расщепляется на пару дочерних фотонов, чьи состояния поляризации

квантово перепутаны. При достаточной мощности лазеров можно сгенерировать десятки тысяч квантово перепутанных фотонных пар в секунду. Затем мы посылаем эти фотоны на удаленные станции (разнесенные на 184 м в эксперименте НИСТ и на 60 м в венском эксперименте), где мы измеряем состояние их поляризации. В то время, пока фотоны летят к измерительным станциям, наша система решает, в каком направлении измерять поляризацию таким образом, чтобы никакой из скрытых параметров не смог повлиять на результат. Таким образом, все лазейки локальности перекрыты. Самая сложная задача при использовании фотонов — помешать им потеряться, поскольку мы должны зарегистрировать более двух третей фотонов, которые образуются в нашей установке, чтобы избежать появления лазеек обнаружения. Большинство обычных однофотонных датчиков работают с 60-процентной эффективностью — они бесполезны для этого эксперимента. Однако в НИСТ мы разработали специальные однофотонные детекторы, сделанные из холодных сверхпроводящих материалов, которые способны зафиксировать более 90% попадающих на них фотонов. Таким образом, и здесь мы все лазейки закрыли.

Повторяя эти измерения поляризации на многих различных квантово перепутанных фотонных парах более 100 тыс. раз в секунду, мы могли быстро набрать статистику по корреляции между состояниями поляризации фотонов. Корреляция, наблюдавшаяся в обоих экспериментах, была намного сильнее, чем предсказанная теориями скрытых параметров. Фактически вероятность того, что результаты НИСТ могли быть получены случайно, составляет порядка одной миллиардной (величина даже менее вероятная, чем выиграть в лотерею *Powerball*), а в венском эксперименте — еще меньше. Сегодня группа НИСТ регулярно использует усовершенствованную версию нашей схемы эксперимента, чтобы получить нарушение неравенства Белла с такой же степенью вероятности менее чем за одну минуту, и дальнейшее усовершенствование ускорит получение такого же результата быстрее на два порядка величины.

Как приручить квантовое перепутывание

Эти эксперименты заставили нас прийти к выводу, что любая модель локальных скрытых параметров, в том числе и та, в пользу которой выступал Эйнштейн, несовместима с природой. Корреляция между частицами, которую мы наблюдали, противоречит нашей интуиции, демонстрируя, что призрачное дальнее действие действительно имеет место.

Наши результаты также указывают на удивительную силу, которой обладает квантовая перепутанность и которую мы, вероятно, когда-нибудь сможем использовать. В ближайшее время

наиболее перспективная область, где могут быть использованы тесты Белла с закрытыми наглухо лазейками, — это генерирование случайных последовательностей. Случайные числа — критически важный ресурс во множестве криптографических методов и технических средств обеспечения безопасности. Если вы можете предсказать следующее число, которое выдает генератор случайных чисел, вы можете незаконно получить доступ к множеству финансовых и коммуникационных систем. Поэтому хороший источник случайных чисел, которые невозможно предсказать, жизненно необходим. Два наиболее распространенных способа генерации случайных чисел — с помощью математических алгоритмов или с использованием физических процессов. С помощью математического алгоритма, если вы знаете условия, используемые в качестве «порождающего элемента», вы часто можете строго предсказать данные на выходе. При использовании физического процесса требуется детальное понимание физического явления, лежащего в его основе. Упустите даже единственную деталь — и хакер сможет использовать случайность или управлять ею. История криптографии полна примеров, когда оба типа генераторов случайных чисел успешно взламывались.

Впрочем, квантовая механика приготовила нам подарок. Можно «извлечь» случайность, присущую по своей внутренней природе квантовым процессам, чтобы получить действительно случайную последовательность. Корреляцию, измеренную в опыте Белла, в котором отсутствовали какие-либо лазейки, можно преобразовать в достоверно случайную последовательность. Примечательно, что потенциально хакеру можно даже передать управление частью экспериментальной установки (которая генерирует квантово перепутанные фотоны). Даже в этом экстремальном случае можно генерировать числа, которые случайны настолько, насколько это позволяет природа. В начале 2018 г. наша группа в НИСТ смогла использовать нашу лишнюю лазеек схему установки Белла, чтобы получить 10^{24} действительно случайных битов из экспериментальных данных десятиминутного сеанса. Было признано, что эти биты случайны, с точностью не хуже, чем одна триллионная. Для сравнения: обычно генератору случайных чисел потребовалось бы несколько сотен тысяч лет, чтобы получить достаточно данных для непосредственного измерения качества их случайности до такого уровня. Сейчас мы работаем над тем, чтобы включить наш генератор случайных чисел в трансляцию для общего пользования. Этот инструмент мог бы работать в качестве источника случайных чисел с привязкой по времени, передавая их по интернету с заданными интервалами, и использоваться в целях обеспечения безопасности всем, кому это необходимо.

На более обобщенном уровне методы, разработанные для лишней лазеек схемы установки Белла, возможно, позволят создать фундаментально новые типы коммуникационных сетей. Такие сети, часто называемые квантовым интернетом, смогут выполнять задачи, которые не под силу классическим информационным сетям. Квантовый интернет, вероятно, позволит обеспечить безопасную связь, синхронизацию часов, создать сеть квантовых датчиков, а также обеспечить безопасный доступ к удаленным квантовым компьютерам в облаке. Другая цель — «независимые от устройств системы криптографии», в которых (в близкой аналогии к трансляции случайных сигналов) пользователь сможет подтвердить надежность общего ключа, проверив соответствие его критериям, устанавливаемым неравенствами Белла.

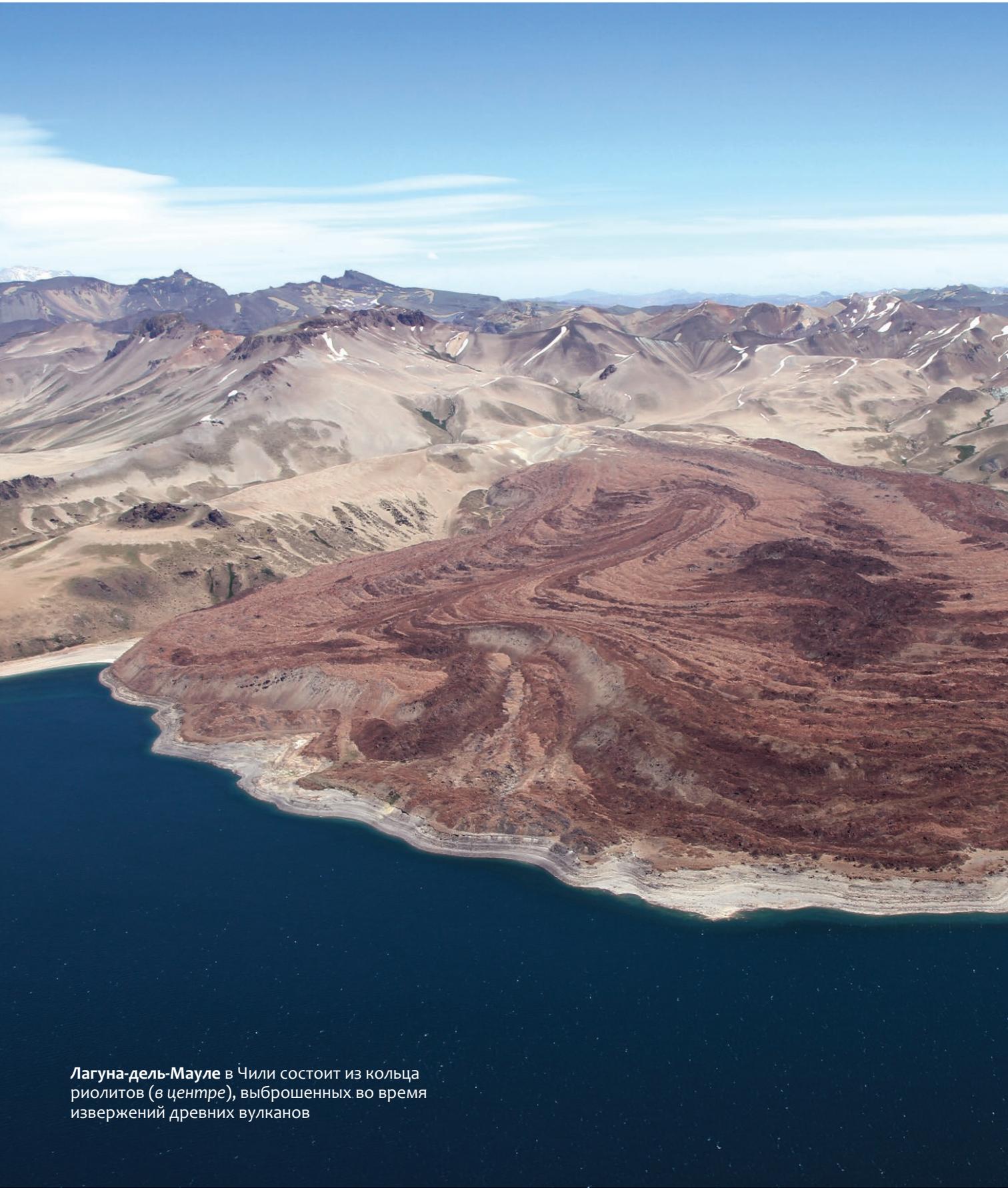
Опорная сеть будущего квантового интернета будет сформирована на основе связей квантового перепутывания, в точности так же, как в схеме установки для проверки неравенств Белла с помощью центров дефектов в кристалле алмаза, удерживаемых атомов и фотонов. В 2017 г. наша группа в Делфте продемонстрировала метод, позволяющий многократно повысить качество перепутывания спинов удаленных частиц, а в 2018 г. мы повысили скорость квантового перепутывания на три порядка величин. Основываясь на этом прогрессе, ученые работают над первой рудиментарной версией квантового интернета, который по плану должен быть реализован между несколькими городами в Нидерландах в 2020 г.

Когда 80 лет назад создавалась квантовая теория, скептиков раздражали ее очевидные противоречия с выработанной на протяжении веков физической интуицией; сегодня четыре эксперимента нанесли окончательный удар по этой интуиции. В то же время эти результаты открыли дверь для такого использования природы, которое ни Эйнштейн, ни Белл не могли даже представить. Тихая революция, начало которой положил Джон Белл, сегодня в полном разгаре. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Малдасена Х. Черные дыры, кротовые норы и секреты квантового пространства-времени // ВМН, № 1–2, 2017.
- Loophole-Free Bell Inequality Violation Using Electron Spins Separated by 1.3 Kilometres. B. Hensen et al. in Nature, Vol. 526; pages 682–686; October 29, 2015.
- Significant-Loophole-Free Test of Bell's Theorem with Entangled Photons. Marissa Giustina et al. in Physical Review Letters, Vol. 115, Article No. 250401. Опубликовано онлайн 16.12.2015.
- Strong Loophole-Free Test of Local Realism. Lynden K. Shalm et al. in Physical Review Letters, Vol. 115, Article No. 250402. Опубликовано онлайн 16.12.2015.



Лагуна-дель-Мауле в Чили состоит из кольца риолитов (в центре), выброшенных во время извержений древних вулканов

СКРЫТЫЙ АД



ГЕОЛОГИЯ

Под Чили, возможно, зреет супервулкан с холодным нутром, что в корне меняет представление о механизмах запуска сильных извержений

Шэннон Холл

Вертолет Airbus забарахлил в ледяном воздухе на высоте сотен метров над чилийскими Андами. Каждый раз, когда он кренится на повороте, он ныряет на 20 м вниз — и зубрины горных вершин, кажется, врежутся в борт вертолета Брэда Сингера (Brad Singer) и войдут сквозь зияющую дыру, где снята дверь для удобства фотографирования. Сотрясения и прямая дорога на землю не придают уверенности Сингеру, геологу, привыкшему к ровным площадкам вокруг Висконсинского университета в Мадисоне, хотя он и пристегнут. «Как будто ты на больших американских горках», — так он вспоминает об этом.

ОБ АВТОРЕ

Шэннон Холл (Shannon Hall) — удостоенная награды научная журналистка, проживающая в Скалистых горах. Основные темы — астрономия, геология, окружающая среда.



Однако внушающая благоговейный ужас картина, лежащая далеко внизу и напоминающая об обширной вулканической деятельности, отвлекает его от опасности падения. Однажды Сингер и его коллеги летели над потоком бледно-розовой лавы, разливавшейся на 20 км² застывшего ландшафта.

Здесь легко могли бы разместиться 25 вершинных кратеров, как Килауэа. И это была только часть того, что геолог приехал увидеть. В этом вулканическом районе, называемом Лагуна-дель-Мауле, можно наблюдать 50 лавовых потоков и 70 отложений пепла вокруг 54-километрового льдисто-голубого озера. Сингер отмечает, что только сверху можно по-настоящему осознать гигантские размеры этого региона, а он исследует его последние 20 лет. Только так можно понять, что Лагуна-дель-Мауле содержит самую большую в мире коллекцию недавно излившихся риолитов, которые в расплавленном виде могут быть особенно взрывными и опасными.

Геологи считают, что эти потоки и отложения созданы 25–30 различными вулканами в течение последних 20 тыс. лет. И эти памятные черты выглядят устрашающе, как и место под названием

Лонг-Валли в Калифорнии, где в добавление к выбросам того, что Сингер называет «обычными взрывами», громадный вулкан вырвал в земле углубление величиной в 500 км² приблизительно 765 тыс. лет назад. Такое геологическое сходство, да еще жуткое вздутие земли в районе Лагуна-дель-Мауле, начавшееся десять лет назад или около того, дает основание предположить, что данный район может стать следующим супервулканом в мире.

Супервулканы обладают одними из самых разрушительных сил на нашей планете. Во время их эксплозии как минимум 1 тыс. км³ твердых пород и пепла вырывается наружу одновременно, то есть выбрасывается в 2,5 тыс. раз больше материала, чем при грандиозном извержении стратовулкана Сент-Хеленс в 1980 г. Из карт магматического очага Лагуна-дель-Мауле недавно стало известно, что он достаточно вырос, чтобы при случае сразу выбросить такую массу в воздух. Хотя Лагуна-дель-Мауле выпускает пар постепенно, в ходе небольших извержений, но выглядит это как модель древних гигантов.

Надо отметить еще одну важную особенность, которая отсутствовала у других известных супервулканов: формирование происходит на наших глазах. До нынешнего дня все, что геологи знали о подобных «мастодонтах», было результатом аналитической работы над образцами, которые тщательно отбирались по крупницам из древних горных пород, отложений пепла и других остатков, а потом проводилась реконструкция нескольких аспектов извержения. Но Лагуна-дель-Мауле

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Мощные разрушительные силы затаились в супервулканах, чьи извержения столь грандиозны, что могут перекрыть континенты.
- Высоко в Андах, в районе Лагуна-дель-Мауле, вырывает вулканическая система, которая может достичь размеров супервулкана на наших глазах. Магматический очаг здесь уже достаточно велик, а следы прошлых извержений говорят о большой мощности.
- Как ни удивительно, эксплозия подобных гигантов происходит в условиях не перегретых расплавов горных пород, а практически твердых масс. Ученые заняты исследованиями пусковых механизмов, которые могут сработать в течение десятилетий.

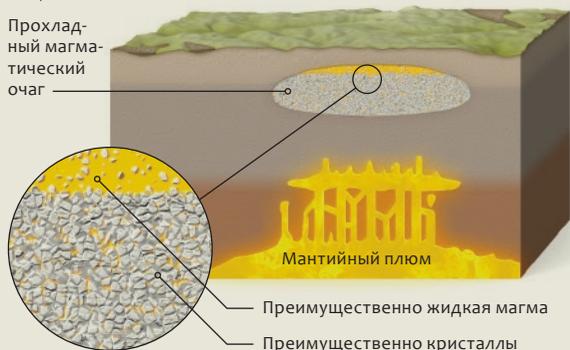
Как извергаются супервулканы

Самые большие вулканы планеты не подпитываются постоянно бурлящим очагом магмы. Согласно последним исследованиям, их основание сложено относительно холодными, почти твердыми горными породами. Теоретически выделены два различных источника пусковых механизмов, которые могли бы быстро разогреть породы до уровня эксплозии.

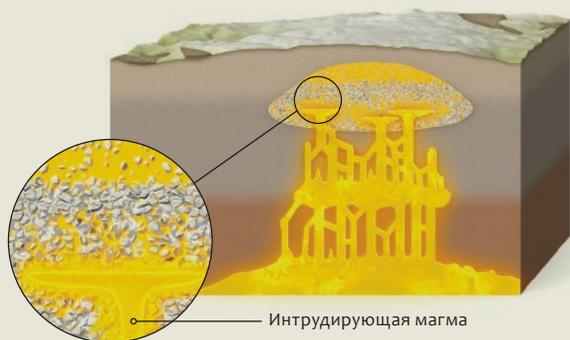
Восходящий мантийный плюм

1 Некоторые супервулканы, например Йеллоустонский, расположены над поднимающимся горячим мантийным потоком. Ближе к поверхности Земли находится очаг прохладнее, главным образом кристаллический, с небольшим количеством горячего жидкого вещества.

Прохладный магматический очаг

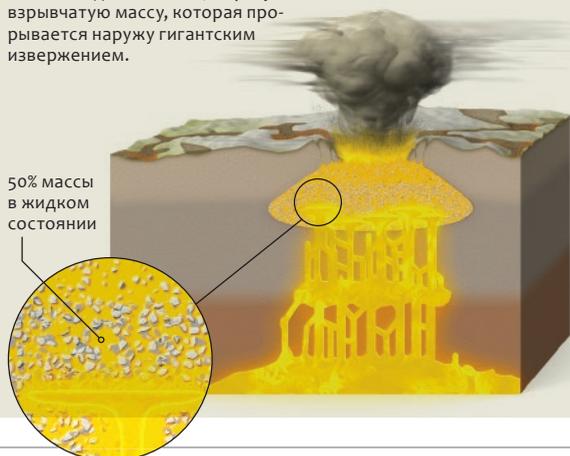


2 Расплавленный материал мантийной струи медленно движется вверх на протяжении сотен лет, подогревая очаг при контакте.



3 Разогретые кристаллы быстро плавятся, вероятно, в течение десятилетий, образуя взрывчатую массу, которая прорывается наружу гигантским извержением.

50% массы в жидком состоянии



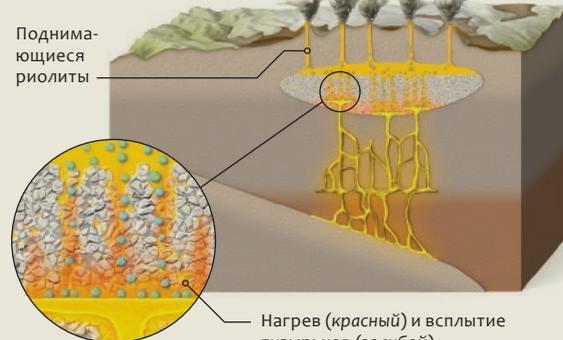
Бурлящие пузырьки

1 Вулканические зоны лежат поверх двух сталкивающихся литосферных плит, где в глубине Земли образуется раскаленная магма. Вверху очаг с кристаллическим кашеобразным веществом — вязким расплавом риолитов — ждет своего часа.

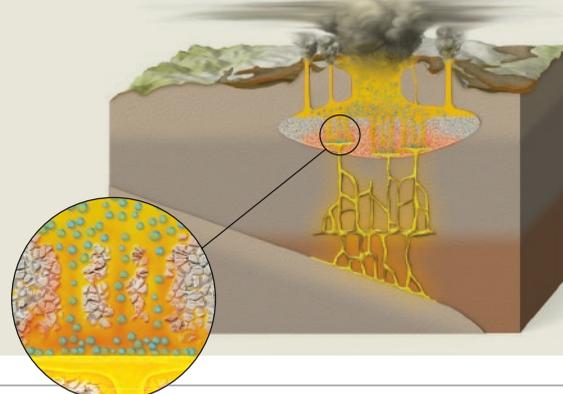
Прохладный магматический очаг



2 Магма достигает очага, и кристаллы плавятся под воздействием жара. Расплав поднимается в камеру, освобождая летучую жидкость, состоящую главным образом из пузырьков воды. Продолжительный нагрев и поднимающиеся пузырьки могут провоцировать выталкивание расплава риолитов, создавая небольшие извержения.



3 Пузырьки собираются у верха очага, выталкивая все больше риолитов в тектонические трещины. Когда расплав достигает вершины, его давление падает, а пузырьки быстро увеличиваются в объеме. Так может возникнуть большое извержение вплоть до размеров супервулкана.



пробуждается прямо сейчас, впервые открывая живой взгляд на развитие катастрофы. «В истории человечества не представлялось случая воочию понаблюдать за мощным извержением супервулканов», — говорит Сингер. (Перспектива подобного испытания вызывает большую озабоченность сотен тысяч жителей близлежащих городов. Извержение супервулкана не предвидится в скором времени, но правительственные учреждения Аргентины и Чили пристально следят за этим регионом.)

Рассматривая Лагуна-дель-Мауле крупным планом и учитывая знания о других, «старших» супервулканах, ученые пришли к неожиданному заключению: гигантские подземные вулканические очаги, подогревающие этих монстров, не представляют собой жаркие бассейны расплавленной лавы, согласно прежним научным взглядам. Напротив, масса настолько прохладна, что часто находится в твердом состоянии. Данное представление ставит вулканологов перед новой загадкой: чтобы произошло извержение, твердая магма должна расплавиться и подняться быстро, за период около десятка лет, поэтому геологам предстоит объяснить, как может произойти резкий переход состояния от холодного к перегретому.

Недавно Сингер и некоторые его коллеги наблюдали признаки того, как прохладный магматический очаг, возможно, был атакован пузырьками горячей воды снизу; наблюдая за другими вулканами, ученые нашли доказательства того, как магма вырвалась из нижней, более раскаленной камеры в верхнюю, что холоднее. Пока ученые стараются собрать воедино все объяснения, настоящие наблюдения в Лагуна-дель-Мауле, вероятно, смогут пролить свет на крупнейшие взрывы планеты.

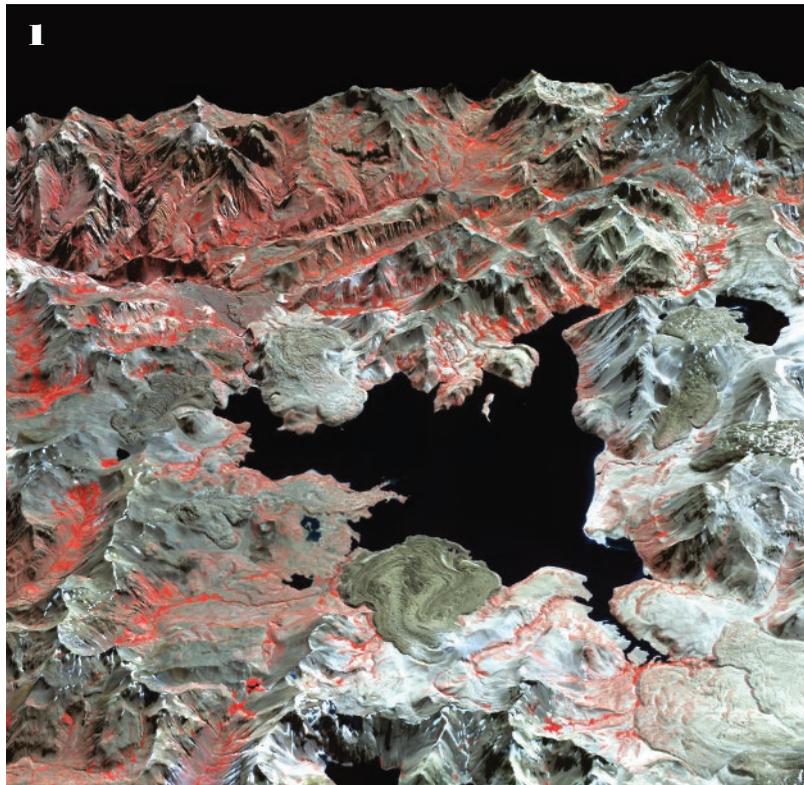
Растущая мощь

Вырвавшиеся на свободу силы исторических супервулканов были ошеломляющи и неустойчивы. Так, например, приблизительно 631 тыс. лет назад, во время извержения одного из них на территории нынешнего Йеллоустонского национального парка в США, смертоносные волны горячего газа, вулканических обломков, пепла и ядовитой пыли накрыли всю поверхность и изменили ландшафт. Изверженный материал заполнил все долины, и его горячие тяжелые массы спеклись в крутые обрывы, достигшие толщины 200 м, наблюдаемые сегодня. Затем небо потемнело от пепла, который выпал на огромной полосе Северной Америки, остался также слой обломочной породы, образовавшей треугольник, его стороны протянулись от нынешней границы с Канадой до Калифорнии и далее до Мексиканского залива. Порой отголоски деятельности

супервулкана могут дать о себе знать всему миру. Несколько вулканов когда-то образовали столь густые завесы пепла, что, как ученые полагают, они перекрыли солнечный свет и Земля погрузилась в вулканическую зиму.

В новое время ни один из супервулканов не проявлял активности. Но в 2008 г. Мэттью Притчард (Matthew Pritchard), геофизик из Корнеллского университета, просматривая данные, полученные со спутника, заметил необычный сигнал, идущий от чилийских Анд. На экране его компьютера открылись необычные светящиеся кольца. Структуры такого типа характеризуют любое изменение высотных отметок поверхности Земли. Но кольца, подобные этим, как правило, располагаются на вершине отдельного известного вулкана, а здесь эта структура распространялась по обширной территории в 400 км², занятой холмами и плато. Случилось что-то необычное. Просматривая ранние изображения, Притчард выяснил, что поднятие, которое, должно быть, происходило между 2004 и 2007 гг., имело скорость 20 см в год. Это самая большая скорость изменения уровня земной поверхности, когда-либо зарегистрированная в мире, и она в десять раз превышает усиленное поднятие в Йеллоустоне, которое наблюдалось несколько раз за последние несколько лет (потом оно остановилось).

Подвижки в Лагуна-дель-Мауле наряду с данными о районах вулканической активности способствовали в последние годы организации ряда





Черты вулканического ландшафта Лагуна-дель-Мауле видны на космическом снимке (1): растительность (красный) и покрытые снегом вершины гор (белый). Геологи устанавливают датчики около озера, чтобы определить поднятие земли (2).

экспедиций с целью определить, на самом ли деле этот район близок к извержениям, и если это так, то как велики они могут быть. В 2013 г. Сингер приступил к выполнению пятилетнего проекта по изучению прошлого и настоящего состояния данной системы. Работая с Национальной службой геологии и горного дела Республики Чили, он со своими коллегами установил около 50 датчиков на земле. Они запустили вертолеты над озером для сканирования земной поверхности. И, взяв в руки лопаты и молотки, они отправились за образцами древних горных пород, которые затем могли бы исследовать в лаборатории.

Все данные свидетельствовали, что под поверхностью Земли назревает что-то очень большое. «Я не хочу быть паникером или кем-то вроде того, но все говорит о том, что происходит развитие очень большого скопления магмы в недрах Лагуна-дель-Мауле», — поясняет Джудит Файрстейн (Judith Fierstein), геолог Калифорнийской вулканической обсерватории в Менло-Парке Геологической службы США. Данные о подземных структурах, собранные по крупицам на основании изучения

колебательных движений, проходящих по ним, а также изменений силы тяжести и электропроводимости различных горных пород, — все указывает на то, что район расположен над бассейном в 450 км³, содержащим взрывчатую риолитовую магму. Сингер говорит, что если вся эта масса взлетит на воздух, то она превратится в 1 тыс. км³ пепла, обломков и лавы, что характеризует минимальную силу извержения супервулкана.

Магма несет опасность не только при одновременном извержении всей массы. При задействовании всего 10% от полного объема данных запасов магмы мощность извержения будет в два раза превышать Кракатау, который, не будучи супервулканом, унес жизни 36 тыс. людей в Индонезии в 1883 г.

Холодный каменный убийца

Одни ученые измеряют размеры Лагуна-дель-Мауле, а другие в это время более озабочены температурным режимом. В классическом представлении магма бурлит в глубине активного вулкана в жидком виде, а затем поднимается к поверхности

земной коры, как шарик в гелевом светильнике. Однако в 2014 г. Адам Кент (Adam Kent) из Университета штата Орегон и Кари Купер (Kari Cooper) из Калифорнийского университета в Дейвисе сделали потрясающее открытие, которое побудило многих из научного сообщества считать, что некоторые вулканы на самом деле могут иметь холодную природу.

Кент и Купер исследовали крошечные кристаллы, заключенные в изверженных горных породах, которые были отобраны на вулкане Худ в Орегоне. До того как эти кристаллы были извергнуты, они росли в магматическом очаге, наращивая слой за слоем, во многом напоминая рост годичных колец дерева, при этом фиксируя всю историю изменений магмы, в том числе ее состав, давление и температуру. Кристаллы, привезенные с вулкана Худ, например, показали, что магма в течение 99% времени своего образования находилась при температуре, недостаточной для излияния. На самом деле она была не жидкой, а кашеобразной, представляла собой сеть кристаллов с жидкостью между ними. Кент поясняет: «Ну, знаете, как арахисовое масло — когда вы вынимаете его из холодильника и пытаетесь намазать, а оно слишком твердое».

Эти выводы заставили ученых задуматься, а не относится ли это к другим вулканам. По-видимому, следует ожидать положительного ответа. В 2007 г. Купер и ее коллеги провели аналогичные анализы кристаллов, изверженных в Новой Зеландии в вулканической зоне Таупо, расположенной в центре острова Северного, где известны несколько извержений супервулканов. Ученые сделали вывод, что эти кристаллы большую часть времени своего формирования находились в условиях прохладной твердой магмы. В конце 2017 г. Сингер и его коллеги проанализировали вулканические обломки, собранные на супервулкане Лонг-Валли, и пришли к тем же результатам. В магматическом очаге в Йеллоустоне также содержится прохладная кристаллическая смесь.

Хотя Кент и Купер нашли признаки пребывания магмы при немного большей температуре в нескольких местах Северной и Южной Америк, напрашивается вывод, что в целом супервулканы имеют обыкновение быть холодными — и они

остаются таковыми до момента их излияния. Это значит, что горячая магма недолговечна, она разогревается только непосредственно перед извержением. Работа Купер с образцами из Таупо показывает, что данные системы перешли в жидкое состояние только за 40 лет до извержения. В Лонг-Велли разжижение продолжается от десятков до нескольких сотен лет. В Йеллоустоне оно происходит лишь десятилетия. Купер говорит, что эти сроки могут сократиться до нескольких лет, ведь ученые имеют склонность публиковать весьма осторожные, с большим запасом, оценки.

Что можно сказать о Лагуна-дель-Мауле? Скорее всего, это крупное магматическое тело из кашеобразной кристаллической массы. Сингер и его коллеги утверждают, что на 95% оно состо-

ит из кристаллов и только 5% занимает расплав. Кашеобразная масса относительно прохладная — около 800° C; лава, низвергавшаяся каскадом по склонам вулкана Килауэа на острове Гавайи этим летом, была, например, около 1200° C, то есть на 50% горячее. Результаты исследований подкрепляют мнение, что хладнокровные гиганты могут проснуться в одночасье. Натан Андерсен (Nathan Andersen), геолог Орегонского университета, исследовавший мелкие кристаллы, включенные в лаву потоков Лагуна-

дель-Мауле, обнаружил, что в магме они пробыли только от 10 до 100 лет.

Пробуждение гиганта

Однако при взгляде на эту картину напрашивается вопрос: как эти замороженные системы расплавляются и мобилизуются столь быстро? В Йеллоустоне последнее крупное извержение супервулкана случилось, когда жидкая магма поднялась из недр Земли и ударила наверху в отвердевший очаг, по утверждению Кристи Тилл (Christy Till), геолога из Университета штата Аризона. Ее модель представлена в общих чертах, ведь ни один ученый не снимал точных измерений в то время, но из анализа вулканических обломков следует, что поднимающаяся жидкая магма смешивалась с затвердевшей, расплавляя кристаллы. При этом нагревалась вся вулканическая камера, и добавленный объем жидкого расплава поднимал давление, пока не происходило само излияние на поверхность.

Супервулканы имеют обыкновение быть холодными — и они остаются таковыми до момента их излияния. Это значит, что горячая магма недолговечна, она разогревается только непосредственно перед извержением

Однако надо отметить, что в Чили все может происходить по-другому. Тилл поясняет: «Не существует единой модели для всех вулканов». Йеллоустон, например, находится на вершине мантийной струи, а Лагуна-дель-Мауле и Лонг-Валли — нет. В этих местах одна литосферная плита погружается под другую, расплавляя породы и превращая их в магму по мере воздействия. Как объясняет Андерсен, это создает различные условия возникновения извержений: бывает, что нагревается только часть содержимого вулканического очага и происходит интенсивное бурление пузырьков.

Когда Андерсен изучал кристаллы изверженных в прошлом пород, собранные в Лагуна-дель-Мауле, он выяснил, что базальтовая магма, зарождающаяся глубже, не полностью пронизывает вулканическую систему. Магма такого типа застряла в основании верхней камеры Лагуна-дель-Мауле, преимущественно заполненной риолитами. Эти два типа горных пород никогда не смешивались. Базальтовая магма охлаждается при остановке, выделяя тепло, идущее вверх. При этом выделяются также легко испаряющиеся пузырьки водяного пара. Как только тепло и пузырьки начинают подниматься, они расплавляют некоторые из соседних кристаллов, создавая струи, полные пузырьков, устремляющиеся к вершине очага. На этом этапе нагнетается столь большое давление, что струи прорываются сквозь твердую поверхность очага.

Такое положение дел беспокоит Сингера. Если неустойчивые потоки пузырьков постоянно поднимаются в недрах Лагуна-дель-Мауле, то для них нет выхода. Вокруг горного озера не наблюдается никаких характерных элементов гидротермальной деятельности, как, например, вроде гейзера Старый Служака или фумарол, горячих источников, активных участков жерл. Сингер беспокоится: «По-моему, все это говорит о потенциально большей опасности района Лагуна-дель-Мауле по сравнению с другими системами». Если некоторая часть газов имела бы возможность утечь, то рост очага мог бы замедлиться. Сингер продолжает: «Но так как этот магматический бассейн заключен внизу и созревает при определенной температуре, в этих условиях, вероятно, система способна очень сильно вырасти, как в Йеллоустоне перед последним крупным извержением. Это может оказаться переломным моментом. И это станет извержением, какого люди еще никогда не видели».

Итак, хотя магматический бассейн под Лагуна-дель-Мауле едва достигает размеров, присущих супервулканам, но он может даже их превысить за ближайшие столетия. Сегодня опасения Сингера больше имеют гипотетический характер — и механизм извержения тоже. Вполне вероятно, например, что поднимающийся расплав, насыщенный пузырьками, не сможет усилить давление

настолько, чтобы самостоятельно произошел гигантский выброс, для этого понадобится помощь местного землетрясения. Команда Сингера в настоящее время пытается определить возможные источники такого дополнительного «пускового устройства».

Даже при условии, что в районе Лагуна-дель-Мауле имела бы место серия небольших извержений, а следы их работы в прошлом запечатлены в покровах лавы и пепла, последствия все же могут отразиться на всей Южной Америке. Пепел может задерживать воздушные потоки в данном регионе и, возможно, целые годы пагубно воздействовать на сельское хозяйство в Аргентине (где он, скорее всего, и оседет ввиду преобладания восточных ветров). Кроме того, принесенный пепел грозит вывести из строя дамбу близ реки Мауле, вызвав катастрофические паводки, которые могли бы ударить по городу Талька, расположенному в долине реки, население которого насчитывает более 200 тыс. человек.

Команда Сингера сняла свои полевые датчики, но ученые из Чили и Аргентины приняли эстафету, установив новые измерительные приборы для наблюдений над озером. В настоящее время в данном регионе продолжают подъемы на воздушном шаре к облакам, что представляется менее опасным. Но если на озере будут в дальнейшем замечены тревожные знаки, исследователи тотчас же смогут точно предсказать следующее извержение, поскольку сейчас они имеют возможность лучше рассмотреть ту искру, что способна разбудить холодного зверя. ■

Перевод: В.И. Сидорова

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Биндеман И. Тайная жизнь супервулканов // ВМН, № 10, 2006.
- Rapid Remobilization of Magmatic Crystals Kept in Cold Storage. Kari M. Cooper and Adam J.R. Kent in *Nature*, Vol. 506, pages 480–483; February 27, 2014.
- Rapid Cooling and Cold Storage in a Silicic Magma Reservoir Recorded in Individual Crystals. Allison E. Rubin et al. in *Science*, Vol. 356, pages 1154–1156; June 16, 2017.
- Incremental Heating of Bishop Tuff Sanidine Reveals Preeruptive Radiogenic Ar and Rapid Remobilization from Cold Storage. Nathan L. Andersen et al. in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 114, No. 47, pages 12, 407–12, 412; November 21, 2017.
- Petrochronologic Perspective on Rhyolite Volcano Unrest at Laguna del Maule, Chile. Nathan L. Andersen et al. in *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 493, pages 57–70; July 1, 2018.

МЕДИЦИНА

ПУТЬ ИЗ

МИРА БЕЗМОЛВИЯ

Достигнут долгожданный прогресс
в лечении глухоты с помощью
генной инженерии

Дина Файн Марон



ОБ АВТОРЕ

Дина Файн Марон (Dina Fine Maron) — бывший заместитель редактора *Scientific American*. В настоящее время работает репортером в журнале *National Geographic*.



Ханна Кордерман (Hannah Corderman) изо всех сил старается заполнить пробелы в своем восприятии окружающего мира, но пока они только увеличиваются. Она не всегда слышит собеседника и просто кивает или улыбается в ответ, когда ей кажется это уместным. Улавливать отдельные слова становится все труднее, несмотря на то что усилитель громкости звука в ее устройстве выставлен на максимум. «Многое из того, что мне говорят, я совсем не слышу, — сетует она. — Но я стараюсь хотя бы домыслить».

Домысливать тоже становится все труднее. Ханна страдает наследственным заболеванием под названием «синдром Ашера», который проявляется медленной, но неуклонной утратой двух основных чувств. Причина тому — мутация, выводящая из строя белки структур внутреннего уха и сетчатки, которые отвечают за восприятие звука и света. На раннем этапе ухудшения слуха еще в подростковом возрасте Ханна начала терять зрение и вынуждена была отказаться от вождения автомобиля в темное время суток. Недавно этот процесс ускорился. Сегодня, в свои 24 года, она плохо видит уже и днем. Никакие имеющиеся в распоряжении врачей средства не позволяют замедлить процесс, и девушка осознает, что

через десять, а если повезет — через 20 лет она полностью оглохнет и ослепнет.

Ребенком Ханна просто слышала чуть хуже других. Но однажды летом, уже будучи студенткой, она, глядя раз за разом на ночное небо из окна своего дома в Нидеме, штат Массачусетс, видела все меньше звезд — и подумала, что их закрывают облака. Но звезды продолжали исчезать, и Ханна обратилась к врачу. Диагноз был ужасающий: синдром Ашера тип 2А, утрата зрения и слуха, развивающаяся в течение многих лет. Она приняла эту весть спокойно — и решила, что ее жизнь будет продолжаться. Сегодня, спустя семь лет после постановки диагноза, она окончила колледж и занимается маркетингом в семейной конструкторской

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Глухота — один из самых распространенных врожденных дефектов. Среди немногих способов избавления от нее — генная терапия, прошедшая проверку в опытах на животных.
- Безопасность и эффективность этого метода доказаны в ходе лечения больных с некоторыми другими патологиями и сегодня апробируются в клинике для борьбы с потерей слуха.
- Один из многообещающих подходов состоит во введении во внутреннее ухо частиц, несущих нормальную копию дефектного гена, ответственного за патологию. Манипуляции, проведенные на лабораторных мышах, привели в ряде случаев к почти полному восстановлению слуха у подопытных животных.

компании, борясь изо всех сил со своим недугом, которому, как она сама говорит, ее не сломить.

Врачи мало что могут сделать в такой ситуации. Иногда они имплантируют больному кохлеарный аппарат, который возбуждает слуховой нерв в обход волосковых клеток внутреннего уха и дает хоть какие-то слуховые ощущения, хотя и весьма притупленные. Что касается глаз, то ретинальные электростимуляторы светочувствительных клеток применяются редко, поскольку получаемое изображение слишком далеко от реальности.

Нельзя сказать, что Кордерман неукоснительно следит за публикациями в научных журналах, но она знает об экспериментах на нескольких сотнях мышей в ряде лабораторий в Бостоне, не так далеко от ее дома. Полученные в результате целенаправленного скрещивания грызуны страдали тем же заболеванием, что и она, но ситуация с ними была лучше. Используя методы геной терапии, биологи включили в их геном сегменты ДНК, компенсирующие дисфункцию дефектных генов, которые кодируют аномальные белки. В прошлом году биолог Гвенаэль Желеок (Gwenaëlle Géléoc) с коллегами из Бостонской детской больницы сообщили о беспрецедентном успехе в восстановлении слуха у таких мышей после инфузии ДНК во внутреннее ухо. Примерно в это же время группа ученых из Гарвардской медицинской школы достигла успехов — правда, более скромных — в применении аналогичного подхода к лечению мышей с другим наследственным заболеванием. Третья группа недавно использовала метод редактирования генома для нокаутирования дефектного гена у грызунов с «синдромом Бетховена», другой разновидностью прогрессирующей глухоты. Все эти достижения позволяют надеяться на то, что генетически обусловленную глухоту — самую распространенную в США патологию из всех болезней такого рода — можно вылечить и даже предотвратить.

За помощью к вирусам

У геной терапии долгое, полное успехов и неудач прошлое. В 1999 г. произошел надевавший много шума трагический инцидент с 18-летним пациентом по имени Джесси Джелсинджер (Jesse Gelsinger), страдавшим печеночной недостаточностью: он умер в ходе одного из первых клинических испытаний с использованием геной терапии, проводимых в Пенсильванском университете.

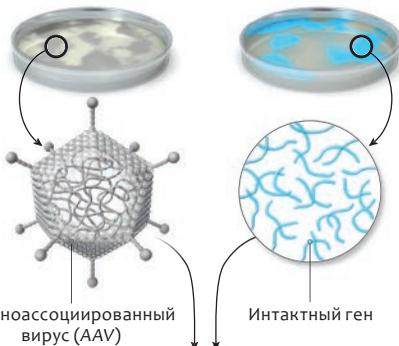


Ханна Кордерман живет с синдромом Ашера с рождения. Ее слух и зрение медленно, но неуклонно ухудшаются.

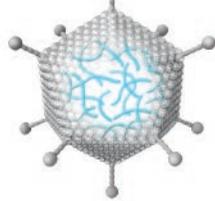
В качестве вектора для доставки в организм нужного гена был использован один из вирусов, но его доза и иммунный ответ были слишком высоки, что привело к аутоиммунной атаке на организм пациента и его гибели. Трагедия охладила энтузиазм общественности, финансирование работ было урезано, а врачи в своем отношении к подобным экспериментам стали крайне осмотрительными.

Впрочем, оставались энтузиасты, которые продолжали исследования, в основном на изолированных клетках и лабораторных животных, в надежде разработать методы терапии, нацеленной на такие сложные заболевания, как остеоартрит, рак и диабет I типа. Они уменьшили дозу вирусных препаратов, используемых в качестве векторов, чтобы не вызвать слишком сильный иммунный ответ, а кроме того, отказались

1 Генетики сконструировали гены для введения их в волосковые клетки внутреннего уха, а также модифицировали один из векторов-переносчиков этих генов — аденоассоциированный вирус.

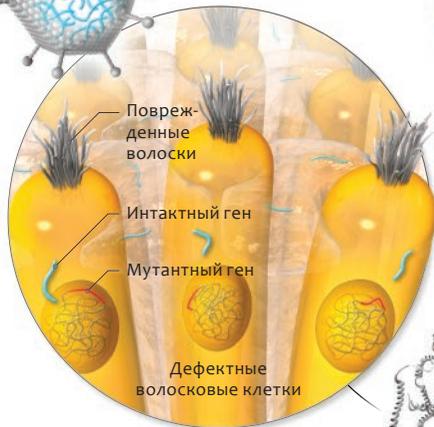
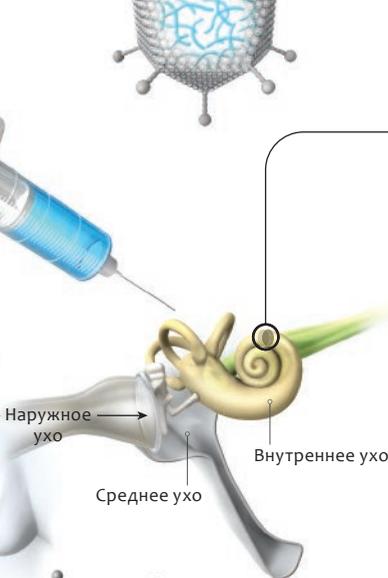


2 Из вирусной частицы удаляют гены, отвечающие за ее инфекционность, и заменяют их генами волосковых клеток.



3 Вирусную частицу, несущую интактные гены волосковых клеток, инъецируют во внутреннее ухо.

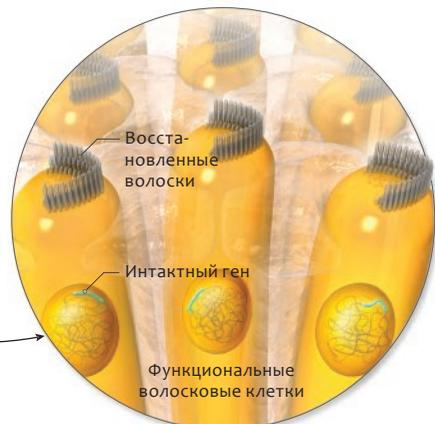
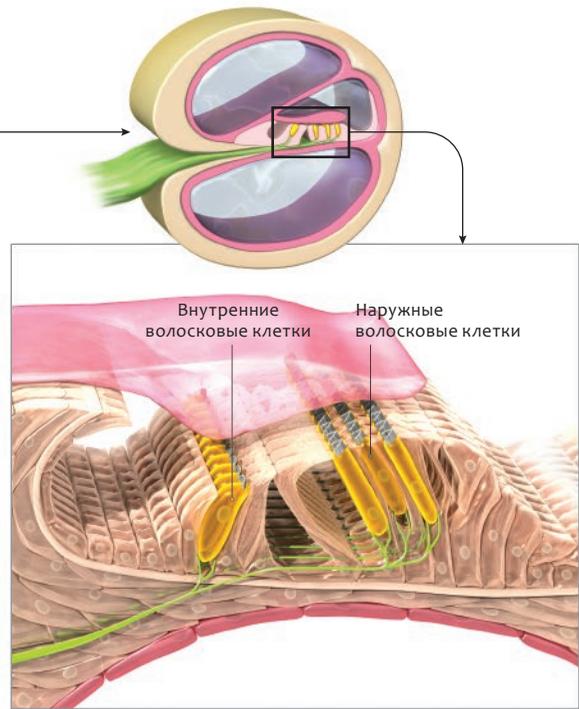
4 AAV инфицирует два типа волосковых клеток. Оба они существенны для восприятия звука, и мутации в соответствующих генах лишают их этой возможности — полностью или частично.



5 Белки — продукты встроенных генов — укрепляют поврежденные волоски. Они становятся упругими и расположенными упорядоченно, а не хаотически.

Как восстановить слух

Некоторые из наиболее распространенных причин потери слуха в раннем детстве имеют генетическую природу. За восприятие звуковых сигналов и передачу их в головной мозг отвечают волосковые клетки во внутреннем ухе, но в результате мутаций они утрачивают эту способность. Опыты на лабораторных мышах привели к разработке метода замены поврежденных генов на интактные. Для этого последние включают в частицы модифицированных аденоассоциированных вирусов (AAV) и инъецируют их во внутреннее ухо. Проникнув в волосковые клетки, вирус высвобождает нормальные гены во внутреннюю среду уха. Если этот подход проявит себя хорошо в клинических испытаниях, его можно будет использовать для устранения патологии при рождении ребенка.



от аденовирусов в качестве векторов и перешли на вирусы других разновидностей. Особенно многообещающим представлялся аденоассоциированный вирус (AAV), оказывающий мягкое воздействие на иммунную систему. В некоторых случаях векторные вирусы предварительно упаковывали в живые клетки и в таком виде вводили в организм-мишень, что сужало поле их действия. Главными в этой области исследований стали «подбор вектора, оптимального для данного заболевания и мишени, а также его дозы», — говорит Синтия Данбар (Cynthia E. Dunbar) из Национальных институтов здоровья, которая недавно занимала пост президента Американского общества генной и клеточной терапии.

Все эти усовершенствования дали результаты. Недавно Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA) США выдало несколько разрешений на применение генной терапии в медицине, указывая тем самым, что время революционного подхода наконец-то пришло. В августе 2017 г. FDA дало зеленый свет одной из разновидностей генной терапии под названием *Kymriah*, направленной на борьбу со специфической формой лейкоза у детей, а в декабре того же года одобрило применение метода для лечения людей с редкой наследственной формой слепоты. Фармацевтические компании и венчурные инвесторы вкладывают в разработки методов генной терапии огромные средства. На состоявшейся в 2018 г. ежегодной конференции Американского общества генной и клеточной терапии присутствовало 3,4 тыс. человек; пять лет назад число участников было всего 1,2 тыс.

Сегодня в центре внимания специалистов находится лечение больных с потерей слуха, которая часто имеет наследственную природу. Среди обычных людей бытует мнение, что глухота развивается с возрастом или становится следствием травмы; на самом деле это один из самых распространенных врожденных дефектов: он встречается у трех из 1 тыс. новорожденных. Более чем в половине случаев причина кроется в генетических aberrациях; это относится и к синдрому Ашера. Таким пациентам генная терапия показана в первую очередь, поскольку за патологию отвечает мутация в единственном гене и, идентифицировав ее, вы сразу получаете диагноз. В некоторых случаях, как

у Кордерман, болезнь прогрессирует медленно, что позволяет устранить генетически обусловленное повреждение. Оно затрагивает волосковые клетки внутреннего уха — именно они улавливают звуковые волны, приходящие извне, и передают соответствующие сигналы головному мозгу. У Кордерман в результате мутации в специфическом гене волосковые клетки «ослаблены», а между тем эти клетки играют ключевую роль в восприятии звука. «Их можно уподобить системе зажигания в двигателе автомобиля, — говорит Дэвид Кори (David Corey) из Гарвардского университета, который занимается восстановлением слуха у лабораторных мышей. — Без них услышать что-либо невозможно».

Один из основных критериев восстановления слуха у мышей — их реакция на резкий неожиданный звук: они мгновенно подпрыгивают на месте. Так ведут себя многие пролеченные животные, но не все

Генная терапия для этих клеток — возможность искоренить дефект, а не компенсировать его с помощью высокотехнологичных устройств. «Достигнутый в последние годы прогресс — важный многообещающий шаг в борьбе с глухотой», — говорит Теодор Фридманн (Theodore Friedmann) из Калифорнийского университета в Сан-Диего, который сам не принимал участия в соответствующих разработках. Конечно, мышь — не человек, и переносить полученные на грызунах результаты на *Homo sapiens* некорректно. Но они приоткрывают дверь к последующему совершенствованию методов борьбы с потерей слуха с помощью генетики.

Стройные ряды

Однажды в 2017 г. я наблюдала, как аспирант Кори Бенсе Дьердь (Bence György) из Гарвардского университета «проскальзывает» в эту дверь. Он склонился над лежащей на лабораторном столе мышью, геном которой содержал гены дефектных волосковых клеток. Мышь находилась под наркозом, и Дьердь сделал крошечный надрез на коже за ухом животного. Раздвигая тончайшие слои тканей, он добрался до маленького участка среднего уха — мембраны



Используя вирусы для доставки функциональных генов во внутреннее ухо глухих мышей, Гвенээль Желеок и Джеффри Холт из Бостонской детской больницы восстанавливают слух у подопытных животных

окна улитки, — открывающего доступ к внутреннему уху, и с помощью тонкой иглы начал медленно вводить в него розоватый раствор, содержащий примерно 200 млрд частиц вируса AAV, каждая из которых содержала нормальную копию гена, опосредующего восприятие звука.

Использование вирусов, например AAV, для транспортировки столь драгоценного груза повышает шансы генов прибыть к месту назначения во внутреннем ухе. Выяснилось, однако, что не любой штамм AAV подходит для этой цели. Отличительная особенность оптимального AAV как вектора заключается в его способности инфицировать волосковые клетки не одного, а двух типов. Другие его штаммы доставляют ДНК во внутренние ряды волосковых клеток, которые общаются с нервными клетками, но не годятся для инфицирования наружных рядов, которые в первую очередь опосредуют усиление звука. «Для полного восстановления чувствительности вектор должен быть одинаково хорош для клеток обоих типов», — говорит Кори, участвовавший в решающих экспериментах по восстановлению функций волосковых клеток.

Методом проб и ошибок и путем перестройки некоторых вирусных генов биологи нашли несколько штаммов AAV, которые справляются с обеими задачами. Они видоизменили поверхностные вирусные белки, принимающие участие в связывании с мишенью; в результате вирусные частицы без труда распознавали молекулы волосковых клеток обоих типов и вирус проникал в последние. В статье, опубликованной Дьердем с коллегами в 2017 г., сообщалось, что авторы сконструировали особым образом модифицированные AAV, достигавшие цели, которые опосредовали образование упругих функциональных волосков у мышей с генетически обусловленной глухотой. Другая группа исследователей использовала AAV для доставки полноценных копий ДНК в волосковые клетки, сходные с таковыми у маленьких детей.

Однако доставка генетического материала — это только часть терапии. Нужно сначала идентифицировать мутации, отвечающие за дефект. Работы по их поиску начались в 1990-х гг. с выявления семей, члены которых страдали потерей слуха и зрения, сходной с синдромом Ашера, и сравнения

их геномов. У слепоглохих людей в геноме присутствуют несколько генов, отвечающих за патологию. Затем исследователи вывели мышей, несущих специфические мутации, чтобы проверить, действительно ли данные генетические aberrации отвечают за патологию. Сравнительный анализ указал на несколько особенностей. Изменения в гене *USH2A*, например, лежали в основе постепенного прогрессирования процесса, как у Кордерман; если этот ген был интактен, волосковые клетки выполняли свои функции нормально. Каждый случай наиболее серьезного и быстро прогрессирующего заболевания, названного *Usher* тип 1, ассоциируется с мутацией в одном из нескольких генов, в частности *USH1C*.

В течение последних десяти лет группа Желеок собрала все эти разрозненные данные воедино. Вместе со своим мужем, отоларингологом Джеффри Холтом (Jeffrey Holt), и другими коллегами Желеок вырезала из генома AAV-вируса с видоизмененной оболочкой гены, связанные с его жизненным циклом, и заменила их интактными *USH1C*-генами вместе с промотором, который отвечал за включение этих генов в волосковых клетках. Прежняя ДНК оставалась на месте и детерминировала синтез неполноценных белков волосковых клеток, но введенные генетические элементы кодировали белки, благодаря которым волоски становились упругими.

Группа из Бостонской детской больницы, используя метод Дьердя, ввела *Usher*-мышам сам модифицированный вирус, который в течение двух недель инфицировал некоторое количество волосковых клеток; через шесть недель он проник в 80% клеток, и мыши стали реагировать на звуки. Один из основных критериев восстановления слуха состоял в том, что животные подскакивали в ответ на резкий внезапный звук. Восстановление слуха произошло практически мгновенно.

Волосковые клетки внутреннего уха выполняют еще одну важную функцию: они отвечают за чувство равновесия и ориентации в пространстве. У мышей с синдромом Ашера возникают проблемы с передвижением и определением положения своего тела. Такие животные не бегают в клетке взад-вперед, а сидят, забившись в угол. Нормальные мыши — отличные пловцы с самого рождения, но их дефектные собратья, оказавшись в воде, в течение нескольких секунд быстро возвращаются, пытаются

определить, где верх, где низ. Если не останется сомнений, что у подвергшихся генной терапии мышей из лаборатории Бостонской детской больницы функция волосковых клеток полностью восстановилась, то этот метод ожидает большое будущее.

Посетив лабораторию Холта и Желеок сразу после поездки в Гарвард, я увидела бывших недавно инвалидами мышей, которые теперь в своем поведении ничем не отличались от нормальных собратьев. Грызуны, перенесшие операцию два месяца назад, активно обследовали клетку; на открытой местности и в воде они по своему поведению ничем не отличались от обычных. Сходство было настолько поразительным, что я переспросила Холта, действительно ли это мутантные мыши. Ученые, обладавшие изощренной системой отслеживания поведе-

Генная терапия сможет помогать только тем утратившим слух людям, которым диагноз был поставлен в раннем детстве, а сама патология имеет генетический характер

ния подопытных животных, каждый раз заверяли меня, что передо мной — бывшие недавно инвалидами вылеченные грызуны.

Масштаб проблемы

К сожалению, несмотря на все эти впечатляющие успехи, прежде чем переходить к применению метода в медицине, нужно решить ряд проблем. Одна из них заключается в том, что природные штаммы вируса AAV слишком малы. Они вмещают гены, корректирующие дефект *Usher* тип 1C, но для устранения других патологий необходимы сегменты ДНК гораздо большей длины. Что касается того типа болезни Ашера, которым страдает Кордерман, то отвечающий за нее ген слишком велик, чтобы «втиснуть» его в частицу имеющихся штаммов AAV. Выходом из этой ситуации может стать разрезание генома вируса на сегменты, включение их в разные частицы и введение во внутреннее ухо всех вместе. Каждый сегмент должен иметь липкие концы, которыми они соединялись бы друг с другом уже в месте назначения, образуя целостный фрагмент нужной длины. У Кордерман ген *Usher* имеет такую большую длину, что для генной терапии

понадобилось бы разрезать его на три части. Несущие их вирусные частицы должны проникнуть в волосковые клетки, где эти части, найдя друг друга, должны соединиться и образовывать полноценный ген. Благодаря высокой специфичности ДНК эта задача в принципе вполне разрешима — в норме соединяются только взаимно комплементарные сегменты ДНК, — но на практике все может оказаться гораздо сложнее.

Другая возможность — использование более крупных, чем AAV, вирусов, видоизмененных так, чтобы они не инициировали полномасштабный иммунный ответ. Можно вообще обойтись без вирусов, заключив генетический материал в наночастицы. Разные научные коллективы, в том числе группа Холта и Желеок, пытаются удалить из генома дефектный ген и заменить его правильной копией, используя метод редактирования под названием *CRISPR/Cas9*. Синдром Ашера — рецессивное заболевание, оно проявляется только в том случае, когда дефектны обе копии гена. Удалив одну из них и встроив интактный вариант, можно устранить патологию, поскольку встроенный ген будет компенсировать дисфункцию другого.

К сожалению, пока никому не удалось решить такого рода задачи *CRISPR*-методом. По-видимому, он подходит скорее для прицельного вырезания нужного сегмента, чем для его замещения. Эксперименты на мышах показывают, что метод годится для восстановления слуха в тех случаях, когда за патологию отвечает одна дефектная копия, а не две. Тогда мутантный ген можно нокаутировать, и всю работу будет выполнять оставшаяся копия. Данный метод апробировали на мышах с «синдромом Бетховена». Результаты обнадеживали, однако позже обнаружилось, что в результате *CRISPR*-редактирования происходят нежелательные изменения в ДНК других, нецелевых клеток. И пока нет никого, кто счел бы, что этот метод можно апробировать на людях. Поэтому единственной перспективой остается применение вирусов в качестве векторов для компенсации дисфункции дефектного гена.

Независимо от того, какая система доставки генетического материала к месту назначения используется и какие еще производятся манипуляции, помочь большинству людей можно будет только в том случае, если болезнь диагностирована в раннем детстве, когда эффективность вмешательства максимальна. В США, где большинство новорожденных проверяют на потерю

слуха, редко удается установить специфичность патологии и ее генетическую подоплеку. Именно это случилось с Кордерман, у которой генетический дефект был идентифицирован, когда она уже училась в университете.

Специалисты в области генной терапии уверены, что они смогут излечивать детей, — и, возможно, это время уже на подходе. «Замечательно, что есть реальные переносчики ценного груза, прокладывающие дорогу через всю систему», — говорит Данбар. Элизабет Олмстед-Дэвис (Elizabeth Olmsted-Davis), занимающаяся экспериментированием в области генной терапии в Медицинском колледже Бэйлора, заявляет, что для нее стало сюрпризом внедрение в последнее время этой инновации в другие области медицины. «Все это — результат работы в течение не одного десятка лет талантливых ученых, которые увидели огромный потенциал нового подхода», — говорит она.

Несмотря на то что интерес к генной терапии растет невероятно быстро, Ханна Кордерман не надеется, что ей это поможет. Так или иначе, она решила для себя жить полноценной жизнью. Она запланировала совершить несколько поездок к Полярному кругу, чтобы полюбоваться северным сиянием: возможно, наступит день, когда это зрелище станет ей недоступно. Она активно общается с товарищами по несчастью, поддерживая их и помогая, чем может. По ее мнению, широкое обсуждение генетических проблем помогает продвижению исследований «и воодушевляет других больных на то, чтобы жить и бороться, а не опускать руки и впадать в уныние». Потеря слуха не означает окончательного погружения в мир безмолвия. ■

Перевод: Н.Н. Шафрановская

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Rescue of Hearing by Gene Delivery to Inner-Ear Hair Cells Using Exosome-Associated AAV. Bence György et al. in *Molecular Therapy*, Vol. 25, No. 2, pages 379–391; February 2017.
- Gene Therapy Restores Auditory and Vestibular Function in a Mouse Model of Usher Syndrome Type 1c. Bifeng Pan et al. in *Nature Biotechnology*, Vol. 35, pages 264–272; March 2017.
- Cochlear Gene Therapy with Ancestral AAV in Adult Mice: Complete Transduction of Inner Hair Cells without Cochlear Dysfunction. Jun Suzuki et al. in *Scientific Reports*, Vol. 7, Article No. 45524; April 3, 2017.

Вход без прививки воспрещен!

Закон об обязательной иммунизации школьников работает

Марк Фишетти

Число детей в США, иммунизированных по полной программе против таких потенциально смертельных заболеваний, как дифтерия и корь, до 2011 г. уменьшалось. С тех пор процесс стал замедляться, а кое-где приобрел обратный характер. Особенно заметен он среди детей, посещающих детские учреждения, на фоне малышей от 19 до 35 месяцев, поскольку, согласно законодательству, в детский сад принимают только тех, которые прошли полный курс прививок. Законы в разных штатах различаются в деталях, но сходятся в одном: «Мы должны защитить наших детей! Кто против?» — говорит Уильям Шаффнер (William Schaffner), профессор профилактической медицины Университета Вандербилта.

Но успокаиваться рано: в старших возрастных группах показатели размываются, возможно потому, что в некоторых штатах не требуется непременно проходить полный курс вакцинации, а родители без труда получают разрешение для своих чад на отсрочку прививок. Молодые родители часто добиваются этого по незнанию — они считают заболевания, против которых требуется делать прививку, неопасными, поскольку в старших классах или университетах о них не говорят, акцентируясь на вопросах безопасности секса и наркозависимости.

Перевод: С.Э. Шафрановский

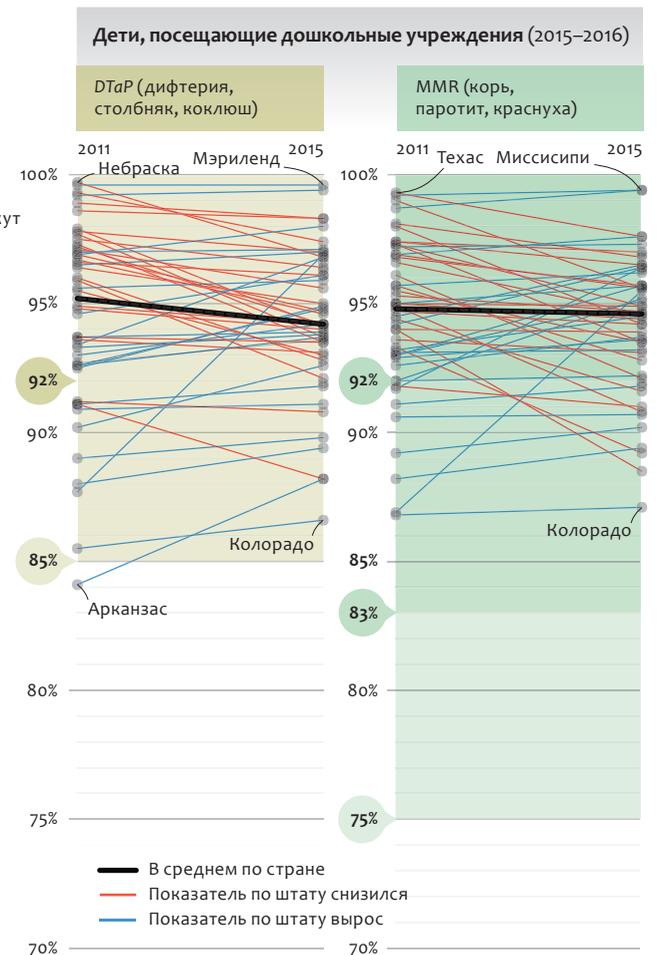
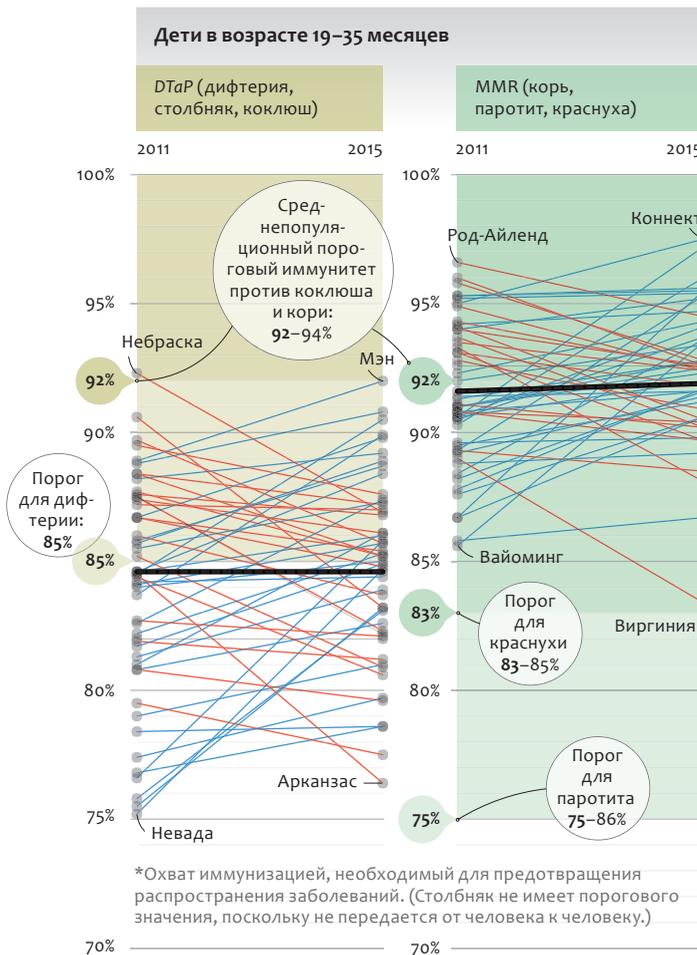
Сколько доз?

Центры по контролю и профилактике заболеваний США дают следующие рекомендации: четыре дозы DTaP-вакцины и одну дозу MMR детям от 19 до 35 месяцев; пять доз DTaP и две дозы MMR детям от четырех до шести лет (последних рекомендаций придерживается большинство штатов при записи детей в школу).

Больше никаких исключений

Некоторые родители обходят закон об иммунизации для детей, поступающих в детское учреждение, что снижает средние показатели по штатам. В 2016 г., когда власти Калифорнии запретили рассматривать заявления родителей об отказе от иммунизации по религиозным или иным соображениям, число исключений по медицинским показателям — заверенных врачом или сфальсифицированных — утроилось по сравнению с 2015 г.

Изменение охвата вакцинацией (2011–2015)



ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

ГОРОДА

Восстановление естественных водных потоков в городах смягчит

Эрика Гиз

An aerial photograph of a city, likely in China, showing a dense urban area with numerous high-rise buildings. A wide river flows through the city. In the foreground, a large park area is visible, featuring a prominent, colorful, winding walkway or bridge structure that curves along the riverbank. The walkway is painted in vibrant colors like red, orange, and yellow. The surrounding area is lush with green trees and vegetation. The sky is clear and blue, suggesting a bright day.

Парк Яньвэйчжоу (в центре) абсорбировал воды реки, поднявшиеся во время интенсивных муссонных дождей, и спас китайский город Цзиньхуа от наводнения

- ГУБКИ

губительные последствия наводнений и засухи



ОБ АВТОРЕ

Эрика Гиз (Erica Gies) — научный репортер, живущая в Виктории, столице канадской провинции Британская Колумбия, и Сан-Франциско. Ее статьи, посвященные общим проблемам науки и окружающей среды, публикуются в таких изданиях, как *Nature*, *bioGraphic*, *New York Times* и др.



21 июля 2012 г. в Пекине разразился страшный ливень. В городе выпало 28 см осадков, вода затопила дороги, подземные переходы и тоннели. Ландшафтный дизайнер Юй Кунцзянь (Yu Kongjian) еле добрался домой с работы. «Мне еще повезло, — говорит он. — Я видел множество людей, которым пришлось бросить свои машины». Потоп вызвал в городе хаос. Во время этого самого мощного за последние 60 лет ливня в Пекине погибло 79 человек. Большинство из них утонули в собственных автомобилях или их засосало в подземные водостоки. Ущерб составил почти \$2 млрд.

По мнению Юй Кунцзяня, соучредителя всемирно известной ландшафтно-архитектурной фирмы *Turenscape*, этого бедствия — результата необдуманного градостроительства — можно было избежать. Несколькими годами ранее, когда он возглавил группу по составлению «карты экологической безопасности мегаполиса», Юй Кунцзянь предупреждал городские власти о необходимости выявлять районы с высоким риском затопления и советовал оставлять их нетронутыми, чтобы с их помощью управлять уровнем ливневых вод. «Наводнение 2012 г. ясно показало, что соблюдение норм экологической безопасности — вопрос жизни и смерти», — говорит он.

Подобная ситуация характерна для всего Китая. Согласно заявлению Министерства жилищного строительства и развития городского и сельского хозяйства КНР, в период с 2011 по 2014 г. затопило 62% городов, что принесло экономический ущерб в \$100 млрд. Одной из причин наводнений были мощные ливни, связанные с глобальным изменением климата. Но основными виновниками выступают люди: в ходе активной урбанизации за последние 30 с лишним лет происходили осушение болот, уничтожение лесов, прокладка асфальтированных дорог, бетонирование берегов рек. И если раньше ливневые воды уходили под землю, то теперь вода скапливается на поверхности и ее уровень повышается.

С разрастанием городов в Китае возникает еще одна проблема — нехватка воды. Здания, заасфальтированные улицы и парковки препятствуют насыщению водоносного слоя. «Вместо этого вода отводится по водостокам и трубопроводам, что неприемлемо в регионах, где не хватает воды», — считает Юй Кунцзянь. Как и большинство городов на севере Китая, Пекин находится вне зоны летних муссонов, поэтому климат там довольно сухой. На протяжении десятилетий потребности растущего населения в воде удовлетворялись за счет грунтовых вод. За год их уровень опускается примерно на метр, что приводит к проседанию грунта.

В результате урбанизации и попыток взять уровень воды под контроль с помощью «серой» инфраструктуры — железобетонных запруд, дамб, плотин, водохранилищ, сетей трубопроводов, заключения рек в бетонные берега — с подобными проблемами сталкиваются многие города по всему миру. Эксперты осознают, что нарушение природного круговорота воды приводит к повышению

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Наводнения и засухи наносят ущерб многим городам. Бетонные русла рек, ливневые водохранилища и трубопроводы не справляются с резко возрастающими потоками воды.
- Градостроительный подход под названием «Города-губки» способен эффективно справляться с наводнениями, сохранять воду для использования ее во время засухи и уменьшать ее загрязнение.
- Юй Кунцзянь возглавляет проект по реорганизации старых городов Китая и строительству новых таким образом, чтобы управлять водными ресурсами, а не бороться с естественными ливневыми водами.



Система озер Кабан в Казани была сильно загрязнена и подвержена наводнениям; теперь ее рекультивированные берега поглощают и очищают сточные воды города

вероятности наводнений и усугубляет их катастрофические последствия по всему земному шару — от Хьюстона в США до Ченнаи в Индии.

Юй Кунцзянь находится в авангарде глобального движения градостроителей, руководителей органов водопользования, экологов и инженеров за восстановление естественного круговорота воды. Эта деятельность представляет собой своего рода антипод инженерии: воде «предоставляют свободу», позволяя ей растекаться по большой площади и впитываться в землю, что предотвращает в дальнейшем нехватку воды. Предусматриваются поддержание и восстановление естественных пойм рек, заболоченных земель, подземных водных потоков, строительство биодренажных систем, сохранение водохранилищ, подтопленных парков и водопроницаемых площадей. В отличие от искусственного ландшафта «зеленая» инфраструктура способна очищать воду и воссоздавать среду обитания диких животных. Кроме того, она позволяет жителям городов приблизиться к природе, что, как известно, представляет собой прекрасный способ релаксации и благоприятно влияет на психику.

Повсюду реализуются локальные ландшафтные проекты. Однако в планах Юй Кунцзяня и других ведущих специалистов — управление водными ресурсами в больших масштабах: целого города, бассейна реки и т.д. «Известные как "зеленая инфраструктура" в Европе, метод минимального

воздействия на окружающую среду при строительстве в США и "города-губки" в Китае, эти мероприятия максимально приближают среду обитания людей к естественной», — говорит Тони Вонг (Tony Wong), разработчик и исполнительный директор *Cooperative Research Center for Water Sensitive Cities* в Мельбурне. Основная цель — создание водной инфраструктуры, которая «работала бы, как живой организм» — заявляет он.

Движение «Города-губки» набирает обороты. В марте 2018 г. Организация Объединенных Наций опубликовала доклад под названием «Природные решения проблем управления водными ресурсами» (*Nature-Based Solutions for Water*), в котором выражается поддержка этого подхода. Инженерные войска США, печально известные своим небрежным отношением к рекам и заболоченным территориям, теперь получили директиву о ведении деятельности с учетом сохранения природы. Интерес к новому тренду проявили Нидерланды, где на протяжении столетий воздвигали дамбы вдоль рек и низменностей. После стихийного бедствия 1995 г., когда резко поднялся уровень воды в Рейне, его рукаве Ваале и Маасе, что привело к эвакуации 250 тыс. человек, правительство страны разработало общенациональный проект под названием «Пространство для реки» (*Room for the River*). Вместо того чтобы возводить более высокие дамбы и плотины, голландские власти решили

пойти на увеличение емкости дельты Рейна, обратившись к сельским жителям с просьбой при необходимости переселиться в другие места или разрешить частично затопить свои угодья.

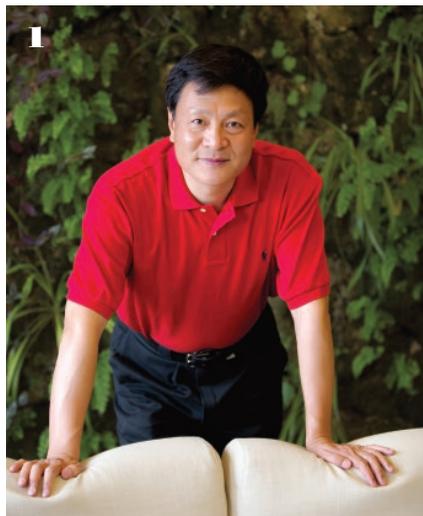
Китай с его стремительным ростом и централизованной властью осуществляет проект «Городогубки» в таких масштабах, какие в большинстве других стран трудно представить. Амбиции впечатляют! Однако Юй Кунцзянь считает, что необходимо отказаться от тенденции единого подхода («всех под одну гребенку»), что может оказаться губительным, поскольку у каждой территории своя уникальная гидрологическая система и свои потребности в воде. Он также выступает против устоявшейся в его стране традиции возведения гигантских плотин, трубопроводов и водохранилищ, которые символизируют собой мощь современного Китая.

Мистер Губка Город

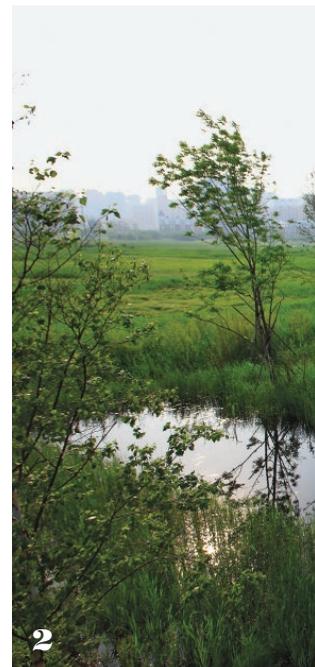
Одним весенним днем я приехал в Пекин, где, как известно, очень высокий уровень загрязнения воздуха, чтобы встретиться с Юй Кунцзянем в штаб-квартире *Turenscape*, расположенной в городском районе Хайдянь. Подтянутый крепкий мужчина лет пятидесяти с острым взглядом и проседью на висках, Юй Кунцзянь, декан факультета ландшафтной архитектуры Пекинского университета и преподаватель Гарвардского университета, проявляет особый интерес к ситуации в расположенной к юго-западу от Шанхая провинции Чжэцзян, где он вырос. Там он на практике приобщился к китайской крестьянской мудрости водопользования, которая практикуется на протяжении тысячелетий. Местные фермеры сооружали небольшие водохранилища и возводили насыпи, чтобы дождевая вода впитывалась в почву и сохранялась там до наступления засухи. В сезоны дождей ручей рядом с его деревней вздувался, но это никого не пугало. «Если вы владеете мудрыми приемами борьбы с наводнениями, вода может стать вашим другом», — говорит он.

Фирма *Turenscape*, созданная Юй Кунцзянем с женой в 1998 г., превратилась в успешную занимающуюся ландшафтным дизайном компанию со штатом в 600 человек. Предприятие осуществило или реализует в настоящее время 640 проектов в 250 городах Китая и в десяти других странах, в том числе реконструирует расположенную в городской черте Казани систему озера Кабан.

За те годы, что Юй Кунцзянь создавал портфолио своей фирмы, многие китайцы высмеивали его фермерские идеи, считая их допотопными. Он говорит, что порой его даже называли американским шпионом, намекая на докторскую степень, полученную им в Гарвардской высшей школе дизайна, и негативное отношение к возведению гигантских плотин. Однако в последние годы настроения в обществе начали меняться. В Китае появились различные



Юй Кунцзянь (1), снятый на фоне «живой стены» своего дома, находится в авангарде продвижения строительства «городогубок» в Китае, в частности ливневого парка в Харбине (2)



группы, которые разрабатывают «зеленые» проекты инфраструктуры, зачастую в сотрудничестве с американцами, австралийцами и европейцами. Одновременно растет и авторитет Юй Кунцзяня. Он регулярно читает лекции в Министерстве жилищного строительства и развития, его книга «Дорога к городскому ландшафту: диалог с мэрами» (*The Road to Urban Landscape: A Dialogue with the Mayors*), написанная в 2003 г., многократно переиздавалась в Китае. Высокопоставленные официальные лица, например посол Мексики в Китае, советуются с ним по вопросам водоснабжения у себя на родине.

Наводнение 2012 г. в Пекине стало поворотной точкой. Вскоре проект по управлению ливневыми водами компании *Turenscape* в Харбине получил в США главный приз в этой области. Центральное телевидение Китая транслировало пространное интервью Юй Кунцзяня. Один из министров, входящий в состав правительства, сказал затем, что это интервью смотрел Си Цзиньпин, который в скором времени стал руководителем страны. Примерно через год, выступая на Центральной конференции по урбанизации, он объявил об инициативе создания «городогубок», что означало переход от обсуждения этой концепции к ее реализации в национальном масштабе.

В 2015 г. правительство инициировало запуск 16 демонстрационных проектов, каждый из которых охватывал не менее 10 км². Сегодня их уже 30. Они нацелены на уменьшение затопления городов, сохранение воды для ее дальнейшего использования, очистку загрязненных водоемов и восстановление природной экосистемы. Предполагается, что к 2020 г. каждый проект сохранит от 70 до 90% среднегодового количества осадков. Премьер



Госсовета КНР Ли Кэцян в своем отчете о работе правительства за 2017 г. указал, что строительство «городов-губок» будет расширяться и в дальнейшем.

Реконструированная река

Через неделю после встречи с Юй Кунцзянем я посетил одно из последних детищ *Turenscape*, Парк реки Юнсин в Дасине, районе городского подчинения Пекина. Три года назад со спутника были получены снимки этой местности. На них видна протекающая по открытому пространству река, русло которой к тому времени уже было выпрямлено, а сама она заключена в крутые бетонные берега. Последние фотографии демонстрируют на этом месте плотную застройку. Сопровождали меня по парку два сотрудника Юй Кунцзяня — Гэн Жань (Geng Ran) и Чжан Мэньюэ (Zhang Mengyue).

«Правительство осознает, что, застраивая земли, мы уменьшаем количество впитываемой в почву дождевой воды, — говорит Чжан Мэньюэ. — Поэтому оно пригласило фирму *Turenscape*, чтобы создать парк, в котором русло реки было бы расширено и тем самым удерживалось больше воды». Когда я побывал там в начале апреля 2018 г., проект находился на завершающей стадии. Парк протянулся вдоль реки примерно на 4 км; ширина его составляет около двух городских кварталов. Мы стоим на большой насыпи, разделяющей русло реки на два протока. Основная масса воды проходит справа; в русле левого протока вырыты большие ямы различной глубины. Во время сезона засухи они заполняются поступающими с очистной станции частично отфильтрованными сточными водами. «В дальнейшем водно-болотистые растения в водоемах очистят воду, — говорит Гэн Жань, — и она попадет в водоносный слой».

Во время сезона муссонных дождей этот проток будет служить резервуаром для ливневых вод, а сточные воды будут обрабатываться обычным промышленным способом.

«Поскольку невозможно сдержать воды рек, — объясняет Гэн Жань, — мы углубляем и расширяем их русла». План *Turenscape* предусматривает удаление бетонных берегов и выемку грунта для расширения русла. Чтобы берега не размывало, вдоль реки в несколько рядов посажены тысячи кустиков низкорослой осоки. Это похоже на картины художника-пуантилиста Жоржа-Пьера Сера. В проекте фирмы *Turenscape* используются местные растения, поскольку они «приспособлены к здешним условиям окружающей среды, — говорит Юй Кунцзянь, — и не нуждаются в дополнительном поливе».

Реализованные проекты уже доказали свою эффективность. Парк Яньвэйчжоу в городе Цзиньхуа, неподалеку от тех мест, где вырос Юй Кунцзянь, защитил население, поглотив воды самого сильного за последние 100 лет наводнения. Раскинувшийся на 14 га ландшафтный парк Хаутан в Шанхае очищает до 2,4 тыс. м³ загрязненной речной воды ежедневно, повышая ее качество с уровня V (непригодной для контакта с человеком) до уровня II (пригодной для орошения ландшафта); при этом используются исключительно биологические процессы.

Подобные проекты наиболее эффективны в комплексе с «зеленой» инфраструктурой по всему бассейну реки, так что ее воды текут примерно по естественному руслу. Строительство с нуля по всей территории Китая новых городов показывает, что такая стратегия вполне осуществима. Фирма *Turenscape* закончила возведение части амбициозного экогорода Улице в провинции Хубэй. Проект сохраняет естественные заболоченные земли для накопления и очистки ливневых вод. Это позволяет уменьшить расходы на строительство подземных дренажных трубопроводов, сохраняя естественную среду обитания для диких животных и растений. На крышах зданий располагаются сады и увитые растениями «живые стены», по территории озелененного парка проложены пешеходные и велосипедные дорожки — все это положительно сказывается на качестве жизни горожан.

За пределами городов

Создать водоохранилище на уже застроенной территории — непростая задача. Архитекторам приходится втискивать крошечные по размерам объекты в существующую инфраструктуру. В Хьюстоне, например, разработчики зачастую вынуждены сооружать биодренаж в пределах одного нового жилого комплекса. В Сан-Франциско рабочие выдалбливают отбойными молотками отверстия в тротуарах и в разделительной полосе дорог, чтобы освободить место для посадки деревьев.

Итак, пришло время для радикальной рекультивации заброшенных промышленных территорий. Фирма *Turenscape* курировала реализацию первого этапа такого проекта в Казани, городе с тысячелетней историей. В пределах города находятся три озера, которые образовались на месте бывшей излучины реки Волги. В советский период в результате загрязнения в этих озерах погибла почти вся живность. Кроме того, город пострадал от наводнения из-за неправильного возведения плотины. При подъеме воды семь насосных станций не смогли справиться со всей ее массой.

В рамках проекта компании *Turenscape*, который частично уже реализован, необходимо рекультивировать 11 км² земли для сбора паводковых вод вдоль реки и ее притоков. На этом месте город создает линейные парки, пешеходные дорожки для прогулок и биодренажные системы, которые удержат, сохранят и очистят городские сточные воды, прежде чем их направят в озера. По пешеходным и велосипедным маршрутам можно будет добраться до прибрежной зоны.

Такие масштабные проекты вдохновляют Юй Кунцзяня на создание не только «городов-губок», но и целых регионов с таким же названием. Он поглощен идеей заботы о ландшафте в национальном масштабе. «Водные экосистемы — говорит он, — крупнее, чем города».

Отчасти под впечатлением «Национального плана» для США, который 100 лет назад создал американский ландшафтный дизайнер Уоррен Маннинг (Warren Manning), Юй Кунцзянь работает над генеральным ландшафтным проектом для всего Китая. «Это невероятно смелый замысел, — говорит Нил Керквуд (Niall Kirkwood), профессор ландшафтной архитектуры и технологии из Высшей школы дизайна Гарвардского университета, который многие годы знаком с Юй Кунцзянем. — Никто больше не мыслит так масштабно и политически грамотно».

На стенах офиса Юй Кунцзяня развешаны карты Китая с изображением рельефа местности, бассейнов рек и русел сезонных паводков и наводнений, а также с указанием биоразнообразия, процесса опустынивания земель, экологической безопасности, эрозии почв и описанием местных традиций водопользования. В ходе осуществления своего грандиозного замысла Юй Кунцзянь может использовать все это наряду с данными географической информационной системы и снимков, полученных с помощью спутников, чтобы отслеживать изменения природного ландшафта Китая по мере урбанизации, заиливания устьев и дельт рек, изменения их русла как в черте городов, так и за их пределами. Он может выделить приоритетные территории, где результат реализации проекта будет максимальным. Керквуд сравнивает это с процедурой иглоукалывания. Юй Кунцзянь

«отдает себе отчет в том, что изменения в одном месте приведут к последствиям в другом», — говорит он. По словам Керквуда, «по сравнению с большинством ландшафтных архитекторов Юй Кунцзянь мыслит целостно».

Требуются нестандартные решения

Двухквартирный дом Юй Кунцзяня, где он живет с сестрой, представляет собой наглядную иллюстрацию его идей. Две смежные квартиры разделяет «живая стена» из пористого известняка. Вода с крыши стекает по ее лицевой стороне, на которой растут адиантум венерин волос и филодендрон. «Зеленая стена охлаждает два дома, поэтому необходимость в кондиционере отпадает», — говорит он, хотя и признает, что летом порой бывает жарковато.

Веранды за окнами спален поливают стекающей с крыши дождевой водой, которая хранится в резервуарах под клумбами с растениями. На верандах изумительно благоухают розмарин, лимонник и китайские хризантемы. Здесь есть даже небольшой водоем с золотыми рыбками. На веранде его сестры в изобилии растут салат и мангольд. «Мы собираем 52 кубометра дождевой воды [ежегодно], а я выращиваю 32 кг овощей», — с гордостью говорит Юй Кунцзянь.

Идеи, воплощенные в доме Юй Кунцзяня, широко применяются при строительстве зданий, но каждый проект «города-губки» должен быть уникален и учитывать местный климат, особенности почвы и гидрологию. «Каждому пациенту необходим индивидуальный подход», — говорит Юй Кунцзянь. Существует опасность, что в спешке китайские проектировщики проигнорируют этот факт. «Если так случится, масштабным амбициям создания "городов-губок" не суждено будет сбыться», — говорит Крис Цевенберген (Chris Zevenbergen) из Международного института образования в сфере водных ресурсов в Делфте, а также приглашенный профессор в Нанкине и Чэнду, специалист по оценке рисков наводнений в городах. — Тенденция в спешке принимать шаблонные решения при возведении городов за последние 20 с лишним лет не оставляла строителям времени осознать недочеты проектирования. Именно поэтому многие города постоянно сталкиваются с проблемой наводнений». К аналогичным последствиям может привести и слепое подражание «городам-губкам». «Программа Си Цзиньпина ограничена жесткими временными рамками, не предусматривающими мониторинг эффективности и корректировку, если таковые потребуются», — утверждает Цевенберген.

В прошлогоднем докладе Китайских правительственных научно-исследовательских институтов высказывается аналогичное опасение. Для контроля процесса строительства сформирован

комитет, в состав которого вошли проектировщики, экономисты и ландшафтные архитекторы, в том числе и Юй Кунцзянь.

Концепция «города-губки» сталкивается и с другими проблемами. Для реализации национального плана в полном объеме потребуются частные инвестиции, и Юй Кунцзянь обеспокоен тем, что компании могут счесть прокладку труб и возведение дамб — за что они надеются получить прибыль — более привлекательными, чем сохранение природных систем, что подразумевается при строительстве «городов-губок».

В широком смысле замыслы не ограничиваются борьбой с наводнениями и засухами. Си Цзиньпин рассчитывает на то, что «города-губки» помогут в решении еще одной серьезной проблемы в Китае: загрязнения окружающей среды. «Органические вещества, тяжелые металлы, пестициды и микрочастицы пластмасс загрязняют поверхностные воды», — говорит Рэнди Далгрэн (Randy Dahlgren) из Калифорнийского университета в Дейвисе, специализирующийся на исследовании химии воды и почвы. — Если удастся создать условия для просачивания этой воды в почву, огромное количество вредных веществ осядет в водно-болотных системах, буферных очистных бассейнах и системах биодренажа», — утверждает он.

Однако водно-болотные системы нельзя просто создать и забыть о них. Фосфор, тяжелые металлы и некоторые соединения азота накапливаются растениями и после их отмирания возвращаются в почву. «Эти растения необходимо удалять», — подчеркивает Далгрэн. Их можно перерабатывать в биотопливо или сжигать, но некоторые загрязняющие вещества, например металлы, нужно удалять из золы и пепла. «Для эффективного удаления большинства загрязняющих веществ из водно-болотных систем требуется грамотный менеджмент», — говорит он. Проектировщики должны внимательно относиться к проблеме очистки поверхностных вод, чтобы не допустить загрязнения грунтовых вод, где примеси и нечистоты могут находиться от десятков до сотен лет.

Если все это будет учтено на уровне проектирования, отдача будет огромной. Благодаря применению концепции «городов-губок» уже сегодня удастся уменьшить загрязнение окружающей среды в таких крупных регионах, как Филадельфия. Как и во многих городах США, ливневая вода здесь проходит через канализационные очистные сооружения, которые во время мощных ливней переполняются — и не очищенные должным образом сточные воды попадают в реки. Реализуя программу «Зеленый город» (*Green City*) в сотрудничестве с некоммерческой организацией *Clean Waters initiative*, город восстанавливает почву вдоль ручьев и рек, чтобы та впитывала избытки ливневых вод, а также разбивает парки, которые при необходимости

можно подтопить. Кроме того, власти стимулируют землевладельцев к созданию дождевых садов, зеленых крыш, городских ферм и использованию в качестве покрытий дорог и тротуаров пористых, проницаемых для воды материалов. Все это дает возможность ливневым водам впитываться в землю, что частично разгружает канализационную сеть. За пять лет в городе озеленено 339 га; этого достаточно, чтобы ежегодно уменьшать объем загрязненных сточных вод на 5,7 млн м³.

Изменение эстетики

В отличие от «серой» инфраструктуры естественные водные системы не статичны и не прогнозируемы: природа хаотична. Уровень воды поднимается и опускается, растения живут и умирают, ил и грязь накапливаются. Нетронутый ландшафт может быть более живописным, чем территории, на которых возведены дамбы или плотины. Но для того чтобы появлялись «города-губки», людям придется смириться с тем, что окружающая среда становится более динамичной.

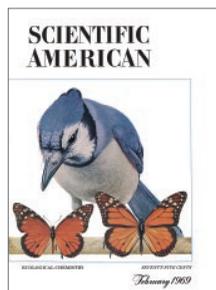
Юй Кунцзянь называет эти изменения «эстетикой больших ног», в противоположность представлениям о красоте крошечных ножек женщин-аристократок. «Сегодня пришло время больших ног», — говорит он. — Нам нужно так изменить наши представления об эстетике, чтобы ощущать красоту полезной «зеленой» инфраструктуры».

В сфере образования тоже придется изменить взгляды на будущее. «Несмотря на государственную поддержку создания "городов-губок", в вузах Китая по-прежнему обучают инженеров по канонам XX в., — говорит Юй Кунцзянь. — Мы прилагаем все усилия, чтобы убедить людей в необходимости экологического пути развития страны». Непоколебимая уверенность в том, что водой можно управлять только с помощью бетона, рухнет тем скорее, чем больше основанных на этом подходе проектов потерпят неудачу ввиду неспособности выдержать воздействие таких факторов, как быстрый рост населения, урбанизация и изменение климата. И хотя «города-губки» не решат все наши проблемы, их жизнестойкость способна противостоять природным катаклизмам лучше, чем бетонные альтернативы. Кроме того, множество связанных с ней преимуществ сделают жизнь людей и других живых существ более качественной. ■

Перевод: С.Э. Шафрановский

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Letters to the Leaders of China: Kongjian Yu and the Future of the Chinese City. Edited by Terreform. Terreform, 2018.
- The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water. UNESCO, 2018.



ФЕВРАЛЬ 1969

Эволюционные войны. «В конце своей книги "Происхождение человека и половой отбор" (1871) Чарлз Дарвин написал: "Основной вывод, к которому приводит это сочинение, а именно, что человек произошел от низкоорганизованной формы, покажется многим —

о чем я думаю с сожалением — крайне неприятным". Полвека спустя его предсказание полностью реализовалось в США, где разыгралась "обезьянья война". Христиане-фундаменталисты, считавшие, что теория эволюции противоречит Библии, пытались не допустить ее распространения, сделав изучение эволюции уголовным преступлением. И только 12 ноября прошлого [1968] г. Верховный суд США постановил, что закон, запрещающий преподавать теорию эволюции в средней школе и колледжах, был неконституционным. Самая известная битва в этом идеологическом конфликте состоялась в 1925 г., когда Джон Томас Скоупс был привлечен к суду в Дейтоне, штат Теннесси, за обучение теории эволюции». — Лайон Спрэг де Камп (Lyon Sprague de Camp).

Роторный двигатель Ванкеля. Двигатель внутреннего сгорания с поршнем возвратно-поступательного хода оказался весьма успешным, однако небольшая армия изобретателей намерена заменить его роторным двигателем. В поршневом двигателе превращение линейного возвратно-поступательного движения во вращательное с помощью коленчатого вала по своей природе ведет к потере энергии, выделяемой в процессе сгорания. Существует 30–40 вариантов роторных двигателей (таких, как сконструировал Феликс Ванкель в 1956 г.). Однако оказалось, что возникает проблема их обеспечения подходящими герметизацией и смазкой, и она присуща практически всем таким двигателям.



ФЕВРАЛЬ 1919

Катастрофа с черной патокой.

Что делает патоку взрывоопасной, особенно в зимнее время, когда липкий сироп густеет? Две недели назад в Бостоне взорвалась большая цистерна с черной патокой, убив 12 человек и ранив 50. Происшествию нет ни одного полностью удовлетворительного объяснения. Цистерна представляла собой огромный цилиндр объемом 9 млн л. Ничто не предвещало беды, как вдруг верх цистерны взлетел на воздух, а стенки разорвались на части. Обломки разлетелись во всех направлениях,

а из цистерны вытекла патока и рекой разлилась среди обломков и по улице, затрудняя дыхание многим раненым и создавая дополнительные трудности работе спасателей.

Синдром колючей проволоки. Доктор Адольф Вишер (Adolf Lukas Vischer) из Базеля написал очерк, посвященный изучению военнопленных и особенно так называемого синдрома колючей проволоки. В заключении во враждующих странах находилось 4–5 млн человек, и многие из них вернутся домой с расстройствами психики. Доктор Вишер рисует картину психического состояния военнопленных, жертвами которого большинство становятся через два-три месяца и от которого полностью излечиваются лишь немногие. Факторы, вызывающие его, — это утрата свободы на неопределенный срок в тесной компании других. Результат — постоянное желание чего-либо при полной неспособности это реализовать. Свои выводы доктор иллюстрирует свидетельствами самих военнопленных.



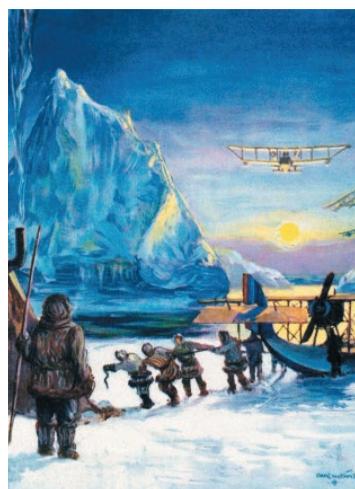
ФЕВРАЛЬ 1869

Опасная процедура. Журнал *Medical Record* публикует отчет об успешной операции по переливанию крови, проведенной недавно доктором Энрико Альбанезе (Enrico Albanese) в одной из больниц Палермо. Джузеппе Джинаццо (Giuseppe Ginazzo), юноша 17 лет из Чинизи, поступил с обширными ранами ноги, которые в конечном итоге привели к необходимости ампутации.

В этой критической ситуации доктор Альбанезе прибег к переливанию крови как единственному еще не опробованному средству. Два сотрудника больницы предложили для этой цели вскрыть свои вены, и таким образом в течение двух различных промежутков времени в кровеносную систему пациента было введено 220 г крови. Сейчас юноша

успешно выздоравливает.

Примечание: классификация групп крови по системе АВО была открыта только в 1900 г. ■



Грандиозные планы по исследованию полярных областей с помощью аэропланов, 1919 г.

Senior Vice President and Editor in Chief:

Mariette DiChristina

Executive Editor:

Fred Guterl

Design Director:

Michael Mruk

Managing Editor:

Ricki L. Rusting

Digital Content Manager:

Curtis Brainard

News Editor:

Dean Visser

Opinion Editor:

Michael D. Lemonick

Senior Editors:

Eliene Augenbraun, Christine Gorman, Steve Mirsky,
Clara Moskowitz, Debbie Ponchner, Claudia Wallis, Kate Wong,

Associate Editors:

Sunya Bhutta, Lee Billings, Andrea Gawrylowsk, Larry
Greenemeier, Dina Fine Maron, Annie Sneed, Amber Williams

Contributing editors: David Biello, W. Wayt Gibbs, Ferris Jabr, Anna Kuchment,
Robin Lloyd, George Musser, Christie Nicholson, John Rennie

Art Contributors: Edward Bell, Bryan Christie, Lawrence R. Gendron, Nick Higgins

Art director:

Jason Mischka

Senior Graphics Editor:

Jen Christiansen

President:

Dean Sanderson

Executive Vice President:

Michael Florek

Executive Vice President,

Global Advertising and Sponsorship:

Jack Laschever

Publisher and Vice President:

Jeremy A. Abbate

© 2019 by Scientific American, Inc.

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Оформить подписку на журнал «В мире науки» можно:

в почтовых отделениях по каталогам:

«Роспечать», подписной индекс:

81736 — для физических лиц;

19559 — для юридических лиц;

«Почта России», подписной индекс:

16575 — для физических лиц;

11406 — для юридических лиц;

«Пресса России», подписной индекс: 45724,

www.akc.ru

по РФ и странам СНГ:

ООО «Урал-Пресс»,

www.ural-press.ru

СНГ, страны Балтии и далее зарубежье:

ЗАО «МК-Периодика»,

www.periodicals.ru

РФ, СНГ, Латвия:

ООО «Агентство "Книга-Сервис"»,

www.akc.ru

Читайте в следующем номере

Эволюция и тренировки

Людам в отличие от их родственников-приматов для здоровья необходим высокий уровень физической активности.

Мозг и питание

Может ли операция по снижению веса изменить процессы взаимодействия между кишечником и мозгом?

Право на попытку

Большинству онкологических больных, никогда не попадающих в число испытуемых, на которых апробируют новейшие препараты, не удается это из-за препятствий, стоящих на пути врачей муниципальных больниц.

Социальная жизнь бабуинов в Амбосели

Тесное сотрудничество, вероятно, помогает бабуинам преодолеть последствия тяжелого детства, и это может оказаться актуальным и для человеческого здоровья.

Код частицы

Ученые разрабатывают математический аппарат, чтобы выявить новые частицы и явления на самом большом в мире ускорителе элементарных частиц.

Последняя надежда

Сможем ли мы удалить достаточно диоксида углерода из атмосферы, чтобы замедлить или даже повернуть вспять изменение климата?



СПЕЦИАЛЬНЫЙ
РЕПОРТАЖ

НАУКА О НЕРАВЕНСТВЕ

ПОЧЕМУ РАСТУЩИЙ РАЗРЫВ МЕЖДУ БОГАТЫМИ
И БЕДНЫМИ СТАНОВИТСЯ ПРОБЛЕМОЙ ДЛЯ ВСЕХ

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Ежемесячный
научно-информационный
журнал

www.sci-ru.org

1/2 2019

12+

СПИМ ОБУЧАЯСЬ

Как
развивать память
в процессе сна

ПЛЮС

ДЕТИ СОЛНЦА

Планетарные открытия в Подмосковье

КОМАНДНЫЕ ИГРОКИ

Взаимодействие микробов
позволяет им править на Земле

НАЗАД ВО ВРЕМЕНИ

В поисках самых далеких галактик во Вселенной



ISSN 0208-0621



19001

9 770208 062001

>