

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Ежемесячный
научно-информационный
журнал

www.sci-ru.org

7 2020

12+

COVID-19: УСПЕХИ МЕДИКОВ МГУ // ВЕРШИНЫ РОССИЙСКОЙ ГЛЯЦИОЛОГИИ



СПЕЦРЕПОРТАЖ

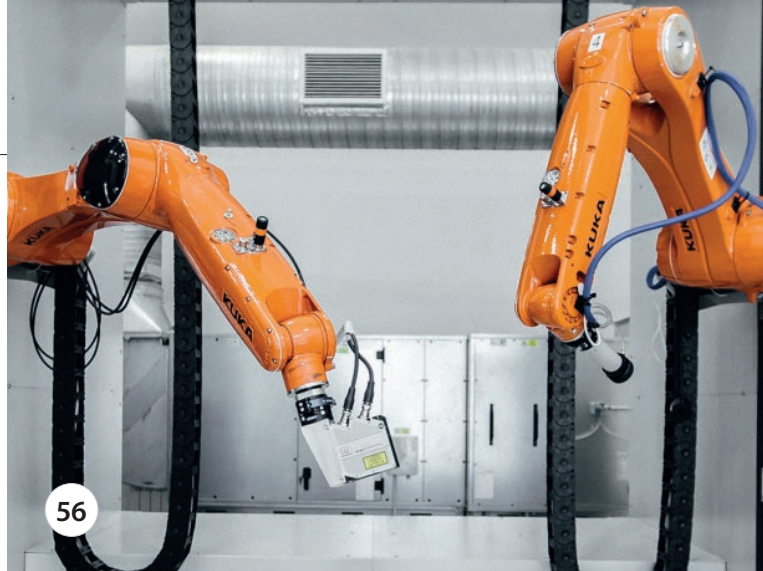
БОЛЕЗНЬ АЛЬЦГЕЙМЕРА: НОВАЯ ЭРА

Свежие подходы в поисках
новаторских способов
лечения заболевания





4



56

Темы номера

СПЕЦИАЛЬНЫЙ РЕПОРТАЖ:
БУДУЩЕЕ МЕДИЦИНЫ

Новая эра для болезни Альцгеймера

4

Прошло более столетия с тех пор, как описано это нейродегенеративное заболевание, но до сих пор нет способа противостоять ему и излечиться. Вероятно, пора радикально обновить подход?

Людские потери

Джеозл Шуркин

Болезнь Альцгеймера унесла мою жену, и никто не смог ничего сделать

Путь вперед

Кеннет Косик

Неспособность найти хорошее лечение для болезни Альцгеймера означает, что пора пересмотреть основные биологические механизмы этого заболевания. Развитие пяти основных направлений может дать новую надежду

Битвы вокруг противоамилоидной терапии

12

Таня Льюис

Популярная концепция терапии болезни Альцгеймера привлекает все более пристальное внимание, но отношение к ней становится все более скептическим

СОДЕРЖАНИЕ

Июль 2020

Связь с менопаузой

18

6 *Джена Пинкотт*

Старение — самый главный фактор риска для развития болезни Альцгеймера. По данным исследований, следующий за ним фактор — женский пол. Почему?

8 Влияние загрязнения воздуха

26

Эллен Руппел Шелл

Мелкодисперсные частицы могут перемещаться из легких в мозг и повышать вероятность развития болезни Альцгеймера

МЕДИЦИНА

12 «Главные враги COVID-19 — вода, мыло и здравый смысл»

32

Наталия Лескова

Секреты удивительной успешности лечения в госпитале медицинского центра МГУ раскрывает член-корреспондент РАН **Симон Мацкеплишвили**



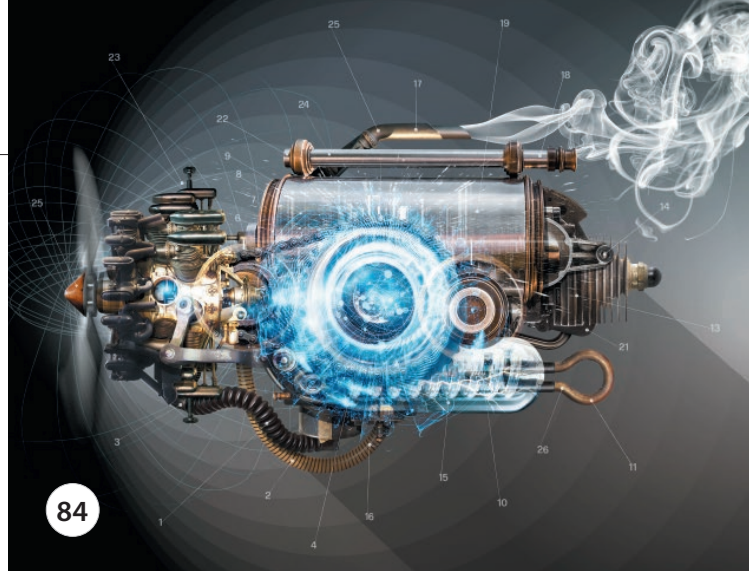
42



92



50



84

ГЛЯЦИОЛОГИЯ

О чем рассказывают льды

Анастасия Пензина

Вице-президент Международной ассоциации криосферных наук **Станислав Кутузов** — о работе гляциологов и самых красивых объектах на Земле

МЕДИЦИНА

«COVID-19 разрушил баррикады между наукой и медициной»

Наталья Лескова

Академик **Дмитрий Пушкарь** и профессор Института системной биологии Ирландии **Марина Грановская** — о сотрудничестве системных биологов и клиницистов

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

Всевидящий ультразвук

Анастасия Пензина

Томские политехники ведут передовые исследования, позволяющие воплощать инновационные технологии в области неразрушающего контроля

ГЕОЛОГИЯ

Тайна Таму

Уильям Сэгер

Новое объяснение образования гигантского вулкана — массива Таму — меняет представление о формировании морского дна

42

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

Жизнь вместе с лесом

Джером Льюис

Пигмеи процветали в бассейне Конго — но лишь до тех пор, пока не началось развитие региона в сочетании с охраной окружающей среды



50

ФИЗИКА

Квантовый стимпанк

Николь Юнгер Халперн

Как в жанре стимпанка стиль викторианской эпохи переплетается с современной техникой, так новая область физики приспособливает термодинамику XIX в. для описания квантовых систем нашего времени



56

БЕЗОПАСНОСТЬ

GPS под угрозой

Пол Таллис

Мы доверяем системе GPS, но оказалось, что взломать ее несложно — и что у США нет защиты от взлома



64

Разделы

От редакции

50, 100, 150 лет тому назад

72

84

92

3

104



32



72

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Наши партнеры:



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



РОСАТОМ



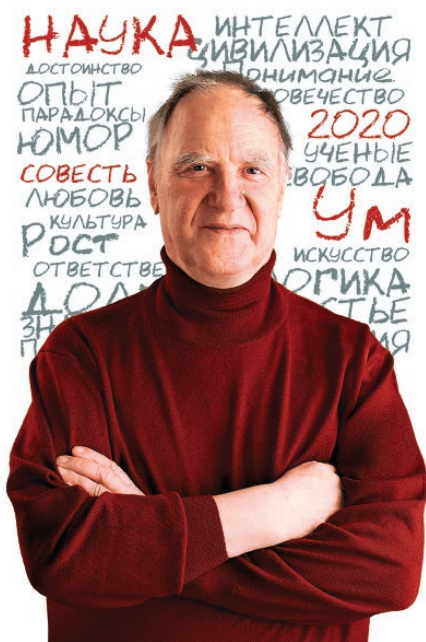
Сибирское отделение РАН



очевидное
невероятное



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



Учредитель и издатель:

Некоммерческое партнерство «Международное партнерство
распространения научных знаний»

Главный редактор:

В.Е. Фортвов

Главный научный консультант:

президент РАН академик 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.б.н. М.В. Грановская; к.г.н. С.С. Кутузов; член-корр. РАН С.Т. Мацкеплишвили;

академик Д.Ю. Пушкар; к.т.н. Д.А. Седнев

Над номером работали:

М.С. Багоцкая, А.П. Кузнецов, С.М. Левензон, Н.Л. Лескова, И.В. Ногаев, А.И. Пензина,

А.И. Прокопенко, В.И. Сидорова, Н.Н. Шафрановская, А.В. Щеглов

Дизайнер:

Д.А. Гранков

Верстка:

А.Р. Гукасян

Корректур:

Я.Т. Лебедева

Фотографы:

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

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

В.Е. Фортвов

Директор НП «Международное партнерство распространения научных знаний»:

А.Ш. Геворгиян

Заместитель директора НП «Международное партнерство распространения научных знаний»:

В.К. Малахина

Финансовый директор:

Л.И. Гапоненко

Главный бухгалтер:

Ю.В. Калинкина

Адрес редакции:

Москва, ул. Ленинские горы, 1, к. 46, офис 138;

тел./факс: 8 (495) 939-42-66; e-mail: info@sciam.ru; www.sciam.ru

Иллюстрации предоставлены Scientific American, Inc.

Отпечатано:

ОАО «Можайский полиграфический комбинат», 143200, г. Можайск, ул. Мира, 93,

www.oaompk.ru, www.oaompk.pf, тел.: 8 (495) 745-84-28, 8 (4963) 82-06-85

Заказ № 0055

© В МИРЕ НАУКИ. Журнал зарегистрирован в Комитете РФ по печати. Свидетельство ПИ

№ 0577-43636 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.

Наука ждет прорыва



Все мы верим и надеемся, что ученые и медики обязательно найдут эффективные средства, которые смогут победить коронавирус. Обнадеживающие новости приходят из лабораторий разных стран. Испытания перспективной вакцины от COVID-19 идут в нашей стране в Национальном исследовательском центре эпидемиологии и микробиологии им. Н.Ф. Гамалеи, Сеченовском университете, в Оксфордском университете, в Пекинском институте биотехнологий, под эгидой Национального института аллергии и инфекционных заболеваний США в Сиэтле, в Университете Эмори и других научных центрах. Из Новосибирска сообщают, что в лаборатории иммуногенетики Института молекулярной и клеточной биологии СО РАН впервые в России получена панель антител из образцов крови переболевших COVID-19, нейтрализующих вирус SARS-CoV-2. Ученые из Колумбийского университета в Нью-Йорке также создали смесь антител, которая нейтрализует инфекцию в организме.

Тем временем ученые и врачи активно обсуждают итоги и стратегии борьбы с коронавирусом, а также уроки, которые они уже извлекли из пандемии. О новых подходах к лечению от COVID-19, которые использовали в клинике Московского государственного университета, рассказывает

заместитель директора по научной работе Медицинского научно-образовательного центра МГУ им. М.В. Ломоносова член-корреспондент РАН С.Т. Мацкеплишвили в материале «Главные враги COVID-19 — вода, мыло и здравый смысл».

Залог успеха в борьбе против коронавируса и других тяжелых заболеваний — тесное сотрудничество ученых и медиков. Как идет диалог между ними? Насколько быстро медицина реагирует на научные открытия? Ответы на эти и многие другие вопросы ищите в статье под названием «COVID-19 разрушил баррикады между наукой и медициной» — дискуссии академика Д.Ю. Пушкаря и профессора М.В. Грановской.

При этом важно не упускать из виду болезни, которые одолевают нас постоянно. В настоящее время в мире от 40 до 50 млн человек живут с болезнью Альцгеймера и связанными с ней деменциями, от которых ежегодно умирают более 2 млн человек. Попытки лечения этого страшного недуга оказываются неэффективными на протяжении уже более чем 100 лет, с тех пор как заболевание впервые было описано. Главный материал американского контента «Новая эра для болезни Альцгеймера» рассказывает о том, что ученые пересмотрели основы физиологии и биологии этого расстройства, чтобы отыскать новые пути для продвижения вперед. Приведет ли этот поворотный момент к эффективному лечению? С осторожным оптимизмом продолжаем надеяться на прорыв.

Сегодня человечество нуждается в прорыве не только в медицине. Меняется климат, тают ледники, происходит деградация вечной мерзлоты. Научное сообщество предлагает следующие меры для недопущения худшего сценария: снижение выбросов и создание механизмов адаптации к неизбежным изменениям.

Что бы ни случилось в будущем, нужно постараться, чтобы наука, а не страхи направляли наши поступки. ■

Редакция журнала
«В мире науки / Scientific American»

БУДУЩЕЕ МЕДИЦИНЫ

НОВАЯ ЭРА ДЛЯ БОЛЕЗНИ АЛЬЦГЕЙМЕРА

Пришла пора начать все заново. Прошло более 100 лет с тех пор, как Алоис Альцгеймер впервые выступил с описанием нейродегенеративного заболевания, которое было названо его именем, но до сих пор у нас нет способа противостоять этому недугу и излечиться. Сегодня 40–50 млн человек во всем мире страдают от болезни Альцгеймера и других форм деменции. Врачи пробовали использовать лекарства, предназначенные для борьбы с определенным типом повреждений, но подобные попытки приводили только к мучительным многократным провалам. Ученые заговорили о том, что пора обновить подход к лечению.

В начале нашего специального репортажа муж описывает, как болезнь забрала его жену, а также полное опустошение, которое недуг принес всем членам семьи (с. 6). Затем мы проанализируем разнообразие внутренних и внешних причин заболевания. По мнению нейробиологов, иммунные реакции в мозге, а также четыре области исследований, на которые раньше обращали мало внимания, могут стать источником для новых надежд (с. 8). Кроме того, мы внимательно рассмотрим «амилоидную гипотезу», которая преобладала при поиске методов лечения, и обсудим, сохраняет ли она актуальность сегодня (с. 12). Еще одна недооцененная тема — почему женщины подвергаются большему риску заболевания, чем мужчины, и наша следующая статья — о новых исследованиях роли эстрогена и менопаузы в когнитивных нарушениях (с. 18). И, наконец, мы сделаем обзор недавних исследований, в которых показано, что загрязнение окружающей среды значительно повышает риск болезни Альцгеймера, и проследим связь между грязным воздухом и повреждением мозга (с. 26).

Джош Фишман (Josh Fischman)



СОДЕРЖАНИЕ

Людские потери	с. 6
Путь вперед	с. 8
Битвы вокруг противоамилоидной терапии	с. 12
Связь с менопаузой	с. 18
Влияние загрязнения воздуха	с. 26



БУДУЩЕЕ МЕДИЦИНЫ НОВАЯ ЭРА ДЛЯ БОЛЕЗНИ АЛЬЦГЕЙМЕРА

ЛЮДСКИ

Болезнь Альцгеймера забрала у моей жены сначала память, потом жизнь и измучила нашу семью. Ни мы, ни медики не смогли ничего сделать, чтобы это остановить

Джоэл Шуркин

Я понял: когда ваш любимый человек страдает болезнью Альцгеймера, нарушения памяти происходят не только у него. Помним ли мы яркую, солнечную личность, полную жизни и творчества, или мы помним человека, который больше не узнает нас и задыхается на койке в доме престарелых? Помним ли мы любовника, с которым объединялись телами, мыслями и приключениями, или человека, неспособного закончить предложение или найти ванную комнату? Как нам жить с тем фактом, что личность умерла на много лет раньше тела? Болезнь Альцгеймера своей чудовищностью, кажется, вытесняет все. Мне трудно вспомнить обычную жизнь с Кэрол до начала страшного недуга.

У моей жены Кэрол Говард диагностировали болезнь Альцгеймера с ранним началом вскоре после 60 лет. Я наблюдал за ее медленным распадом, за тем как ее великолепный ум постепенно разрушался, наблюдал, как ее личность день за днем угасает, пока она не оказалась, ну... не здесь.

Когда Кэрол узнала диагноз, она была полна решимости бороться с болезнью, участвовала в двух клинических испытаниях потенциальных лекарств, и оба они провалились. Когда мы поняли, что это неизбежно, она сказала мне, что хочет, чтобы я помнил ее, когда она уйдет. Она злилась, что несколько десятилетий исследований болезни

Альцгеймера не дали ничего обнадеживающего. Нет ни лечения, ни способа купировать симптомы.

Я расскажу вам, кем она была и кем стала. Это была женщина необычайной красоты с глазами цвета весенней небесной синевы. Она была миролюбивой и очень умной, нежной и доброй. Я познакомился с ней, когда она слушала курс научной коммуникации, который я вел в Калифорнийском университете в Санта-Крузе. Она всегда вставляла нужное слово точно туда, куда надо. Кэрол занималась морской биологией и написала популярную книгу о своей диссертационной работе с двумя атлантическими дельфинами — афалинами. Мы безмятежно жили 15 лет среди секвой в горах Санта-Круз и писали. Потом она переехала со мной в Балтимор и работала в Центре альтернатив тестирования на животных в Школе общественного здравоохранения Университета Джонса Хопкинса. Это была отличная работа, и Кэрол ее любила.

Примерно шесть лет назад начали происходить странные вещи. Кэрол внезапно отключалась. У нее пропало либидо. Однажды вечером она сидела перед своим рабочим компьютером и плакала, потому что забыла, как загрузить файл. Она перестала читать книги. Вскоре было проведено медицинское обследование и был получен страшный диагноз.

Джоэл Шуркин (Joel Shurkin) написал девять книг о науке и истории науки. Он преподавал академическое письмо в Стэнфордском университете, Аляскинском университете и Калифорнийском университете в Санта-Крузе.



Е ПОТЕРИ

Она все еще любила гулять, но могла потеряться, поэтому я дал ей GPS-трекер. Если она не могла самостоятельно найти дорогу, я встречал ее или кто-нибудь из наших соседей приводил ее домой. Однажды она вышла из дома (который оказался незапертым) и начала кричать на улице. На семейном празднике в честь Дня благодарения она вышла из нашей спальни и прошла по дому голой. Когда ее состояние ухудшилось, она часами сидела в гостиной, уставившись в пустоту, и свет в ее прекрасных глазах угас. Я разговаривал с ней, рассказывал ей о том, как прошел день, не имея ни малейшей надежды, что она услышит меня или ответит. Мы были в доме вдвоем, но фактически я был один.

В январе прошлого года я упал, сломал колено и несколько ребер, и меня пришлось увезти в больницу. Наша дочь Ханна, понимая, что ни она, ни я не сможем заботиться о ее матери, нашла хороший дом престарелых, работающий с программой *Medicaid*. Я выздоровел и навещал Кэрол регулярно, два раза в неделю, наблюдая, как она увядает. Как-то раз она решила, что я ее отец. Дважды я видел, как она яростно сопротивлялась помощи; я никогда бы не подумал, что она способна на такую физическую агрессию.

Я никогда не забуду ее уход. В полдень 25 октября 2019 г. Ханна с другом держали ее за руки, Кэрол слегка приподнялась, издала булькающий звук и упала замертво. Я закрыл ей глаза. Это произошло за месяц до ее семидесятилетия и за месяц до 28-й годовщины нашей свадьбы.

Одним из результатов произошедшего стала финансовая катастрофа — единственный возможный итог для многих американцев при нашей неадекватной системе здравоохранения. Нам пришлось нанять специалистов для решения юридических вопросов за \$12 тыс. Мне сообщили, что

для программы *Medicaid* в Мэриленде я недостаточно беден: они оплатили бы для Кэрол содержание в доме престарелых, которое стоило около \$80 тыс. в год, если бы у меня на счету в банке было бы не больше \$2,5 тыс. Нам пришлось потратить пенсионные накопления Кэрол, и я вынужден был продать дом и переехать в съемную квартиру. Моя жизнь перевернулась с ног на голову.

Какой я вспоминаю Кэрол? Ее болезнь и смерть — более недавние события, поэтому, естественно, они помнятся лучше. Но какие воспоминания помогут мне бороться с чувствами ужаса и унижения, оставшимися от болезни Альцгеймера? Потускневший взгляд? Грязные подгузники? Незаконченные фразы? Пустой банковский счет? Злость?

Мне лучше помнить вот что: три с половиной года назад, еще до того как состояние Кэрол резко ухудшилось, я узнал, что Королевский оркестр Концертгебау, один из лучших в мире, играет в Амстердаме мое любимое музыкальное произведение — симфонию «Воскресение» Густава Малера. Кэрол согласилась, что нам надо пойти.

Концерт был потрясающим. Потом мы шли, держась за руки, по травянистому парку в легком тумане, который приглушал звуки большого города. Кэрол не говорила ни слова. По ее лицу я понял, что она была включена и осознавала, более того, она поняла все, что Малер хотел сказать своей страстной музыкой. По мнению ученых, музыка обрабатывается в мозге таким образом, что при болезни Альцгеймера ее восприятие не повреждается очень долго.

Это был последний раз, когда мы занимались любовью, и последний раз, когда Кэрол ненадолго вернулась ко мне — живая, мудрая, прекрасная Кэрол. Кэрол с глазами цвета весенней небесной синевы. Я постоянно напоминаю себе об этом. ■



БУДУЩЕЕ МЕДИЦИНЫ

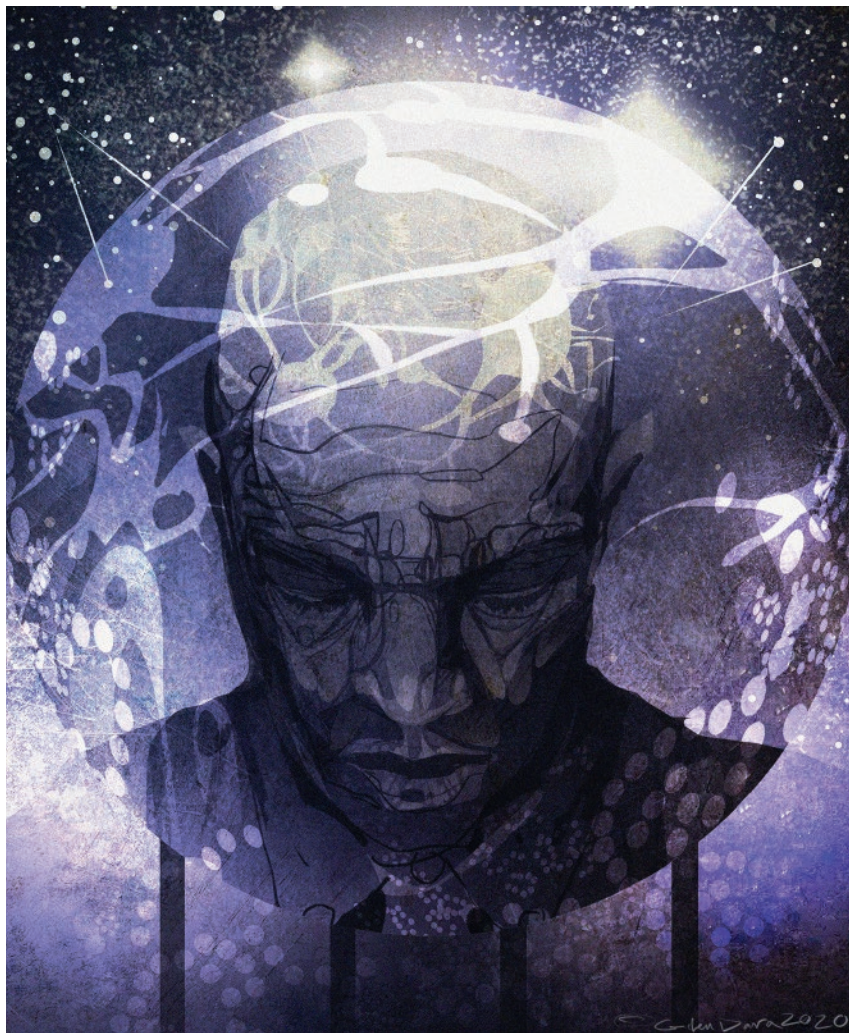
НОВАЯ ЭРА ДЛЯ БОЛЕЗНИ АЛЬЦГЕЙМЕРА

ПУТЬ ВПЕРЕД

Неспособность найти хорошее лечение для болезни Альцгеймера означает, что пора пересмотреть основные биологические механизмы этого заболевания. Развитие пяти основных направлений может дать новую надежду

Кеннет Косик

Не существует фундаментальных причин, почему мы не могли бы разработать лекарство от болезни Альцгеймера. Другие человеческие беды, такие как насилие, алчность и нетерпимость, связаны с ошеломляющим количеством причин и моментов неопределенности. Но болезнь Альцгеймера по своей сути — это проблема клеточной биологии, и решение должно быть нам вполне доступно. Существует довольно большая вероятность, что у ученых уже есть лекарство, но еще не признанное, запрятанное в лабораторной морозилке среди множества других флаконов с разными веществами. А главные открытия могут лежать, ожидая своего часа, в больших базах данных или реестрах клинических записей, нейропсихологических профилей, томографических исследований, биологических маркеров в крови и спинномозговой жидкости, геномов, белковых анализов, регистрации нейронов, моделей на животных или на культурах клеток.



противоамилоидной терапии», с. 12). Не то чтобы это направление было совершенно бессмысленным, но мы так увлеклись, что игнорировали изучение других путей и даже механизмов появления бета-амилоида.

Пришло время вернуться к основам. В качестве ученого я в течение трех десятилетий занимался болезнью Альцгеймера, участвовал в крупных проектах, исследуя семьи с высоким риском заболевания, способы профилактики и физиологию повреждения клеток мозга при этом недуге. Мы с коллегами из многих научных и медицинских областей считаем, что необходимо освежить фундаментальные представления о физиологии и биологии болезни Альцгеймера и пересмотреть содержимое баз данных и наших лабораторных холодильников в поисках подсказок, которые мы, возможно, упускаем. Такой подход позволит нам разработать теории и модели развития болезни, и мы сможем использовать эти идеи для создания новых стратегий борьбы с заболеванием.

Благодаря важным открытиям, сделанным в последние несколько лет, можно выделить как ми-

но мы упустили эти нити, потому что в исследованиях болезни Альцгеймера на протяжении десятилетий тратили слишком много времени в погоне за каждым ярким новым открытием и слишком мало размышляли о биологических механизмах заболевания. На самом деле наша работа была основана на нескольких предположениях, и в них центральная и доминирующая роль отводилась белковому фрагменту бета-амилоиду. Существует большое количество данных в пользу идеи, что бета-амилоид играет важную роль в этом заболевании. Мы разработали лекарства, позволяющие снижать концентрацию этих белковых фрагментов у людей с болезнью Альцгеймера, но в целом это не позволило сколько-нибудь значимо замедлить ухудшение когнитивных способностей.

Считалось, что удаление или подавление образования бета-амилоида уберет симптомы или вылечит больных, однако сейчас такое представление кажется слишком упрощенным, особенно если учесть, что у нас отсутствует полное и глубокое понимание механизмов развития и прогрессирования заболевания (см.: «Битвы вокруг

минимум пять потенциально эффективных и актуальных направлений для исследований. Это поможет расширить наши знания и, вполне вероятно, даст информацию, необходимую для поиска новых эффективных способов лечения. Среди направлений — нарушение выведения опасных белков из клеток мозга, повреждения вследствие воспаления, сложности с передачей электрических сигналов между клетками. Это разные проблемы, но у человека они накладываются одна на другую, вызывая заболевание в мозге. Вместе или по отдельности они могут быть причиной тех ужасных повреждений, которые возникают при болезни Альцгеймера.

Проблемы утилизации белка

В начале 1900-х гг. несколько невропатологов, в том числе Алоис Альцгеймер, тот самый ученый, в честь которого названо заболевание, описали микроскопические повреждения в мозге умерших пациентов, имевших различные формы деменции. Сейчас мы знаем, что это сгустки деформированных белков. При болезни Альцгеймера некоторые

ОБ АВТОРЕ

Кеннет Косик (Kenneth Kosik) — ученый-медики, руководивший крупными исследовательскими проектами, посвященными ранней стадии болезни Альцгеймера. Его лаборатория участвовала в открытии в мозге тау-белка, который считается важным признаком заболевания. Косик — профессор нейробиологических исследований и соруководитель Института нейробиологических исследований Калифорнийского университета в Санта-Барбаре



сгустки состоят из белкового фрагмента — бета-амилоида. Они расположены между нейронами и называются сенильными бляшками. Другие сгустки находятся внутри нейронов, состоят из тау-белка и называются нейрофибрилярными клубками.

Чего мы не знаем до сих пор, хотя прошло уже более 100 лет, — так это почему клетки не могут избавиться от этих аномальных сгустков. Клеточные механизмы удаления поврежденных белков стары, как сама жизнь. Что идет не так при болезни Альцгеймера? Этот вопрос так же важен для понимания механизма болезни Альцгеймера, как вопрос о потере контроля над клеточной пролиферацией — для понимания механизма развития раковой опухоли. Некоторые недавние наблюдения, сделанные исследователями из Университета Вашингтона в Сент-Луисе и из других учреждений, показывают, что аномальные белки могут выходить из клеток, вероятно, избегая естественных механизмов обнаружения плохих молекул. Мы не знаем, как им это удастся, но это необходимо выяснить для понимания механизмов развития болезни Альцгеймера.

У клеток есть две основные системы удаления аномальных белков: убиквитин-протеасомная система (УПС) и аутофагия. В первом случае белки поступают в бочкообразную клеточную структуру, которая называется «протеасома», там белки разрезаются на кусочки, которые затем могут использоваться клеткой повторно; во втором случае клетка переваривает аномальный белок, полностью его разрушая. В нейронах обе эти системы совместно

контролируют структуру клеточных сигнальных связей, образованных аксонами, дендритами и синапсами, которые усиливаются или ослабляются в результате обучения. (Иногда нейроны выводят поврежденный белок, и тогда его разрушает микроглия — клетки, отвечающие за иммунную защиту в мозге.)

Решение, отправится ли аномальный белок в сторону УПС или по пути аутофагии, в основном зависит от размера белка. У протеасомы узкое, похожее на пору отверстие с обоих концов, и туда могут проникать маленькие, тонкие нитевидные

Очистка от плохих белков

Скопления белкового фрагмента под названием «бета-амилоид» и клубки тау-белка — два классических признака болезни Альцгеймера. При этом заболевании системы, предназначенные для избавления от аномальных белков в клетках головного мозга, не справляются со своей задачей, и ученые хотели бы разобраться, что именно происходит неправильно. Обычно клетки используют два способа очистки. Небольшие одиночные белки доставляются в убиквитин-протеасомную систему, где бочкообразная органелла протеасома расщепляет белки до аминокислот. Для переработки более крупных сгустков и скоплений используется аутофагия, для этого сгустки инкапсулируются, и затем расщепляются с помощью ферментов из другой органеллы — лизосомы.

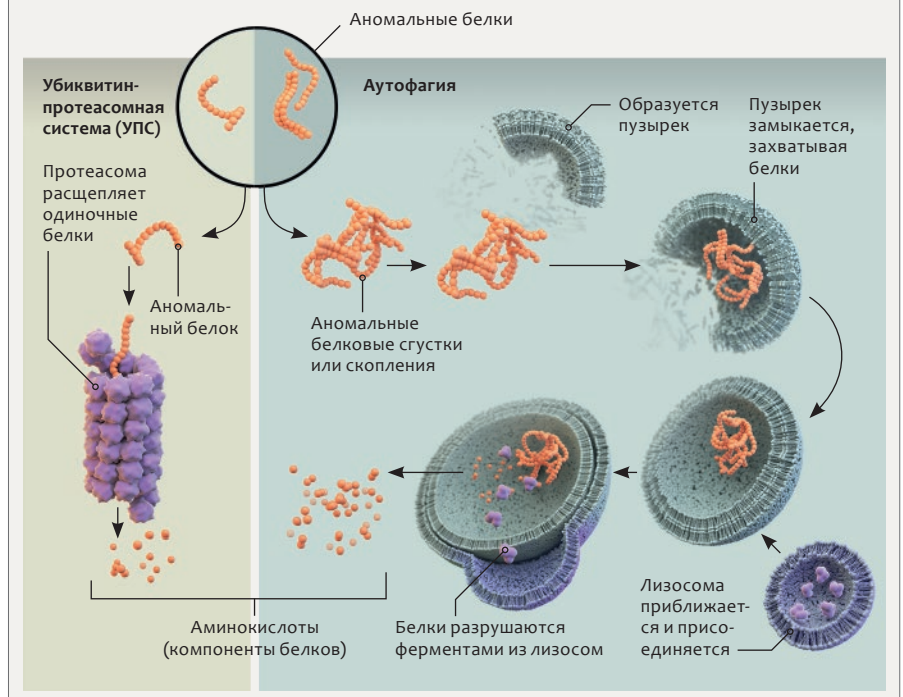
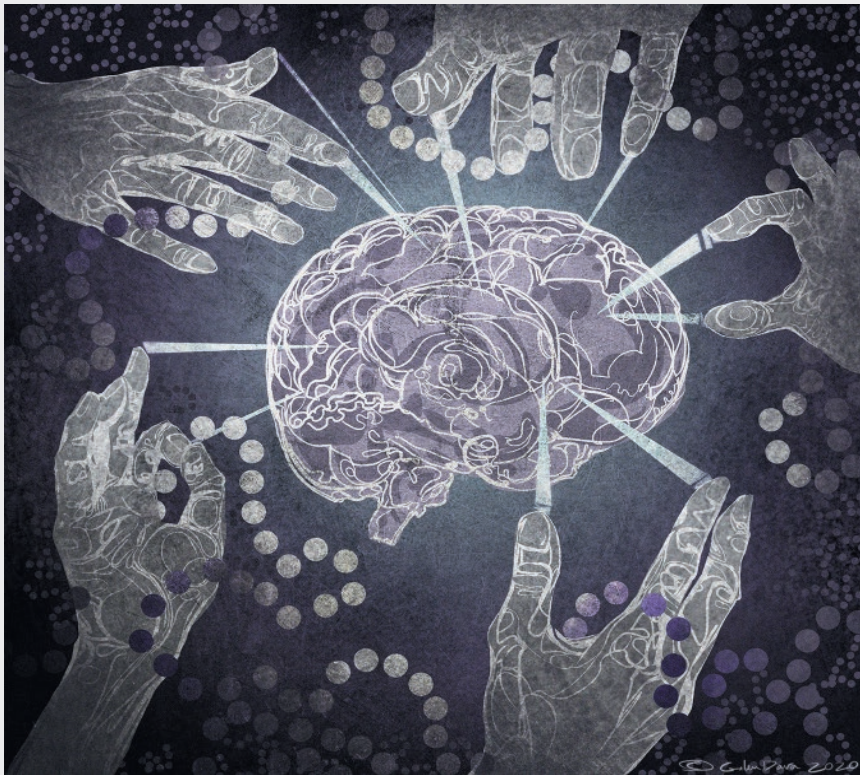


Illustration by Campbell Medical Illustration



БИТВЫ ВОКРУГ ПРОТИВОАМИЛОИДНОЙ ТЕРАПИИ

Таня Льюис

Популярная концепция лечения болезни Альцгеймера привлекает все более пристальное внимание, но отношение к ней становится все более скептическим

В марте 2019 г. биотехнологический гигант *Biogen* прервал два масштабных клинических испытания своего нового препарата под названием адуканумаб — кандидата на роль спасителя пациентов, страдающих болезнью Альцгеймера, — поскольку никакого улучшения памяти в результате его приема у больных не наблюдалось. А через несколько месяцев к всеобщему изумлению *Biogen* и его партнер,

японская фармацевтическая компания *Eisai*, сообщили, что они подали заявку в FDA с просьбой о выдаче разрешения применения своего продукта в клинике. По словам представителя *Biogen*, более детальный анализ результатов испытаний показал, что у членов подгруппы испытуемых, получавших препарат в высоких дозах, все-таки отмечалось улучшение состояния, которое разработчики связывают

со способностью адуканумаба растворять сгустки специфического белка, бета-амилоида, в головном мозге.

Такая двойственность оценок на фоне неудач с тестированием других расщепляющих амилоидные бляшки веществ поставила перед экспертами вопрос: действительно ли эффективна терапия, которая долгое время считалась оптимальной при данной патологии?

Ряд исследователей пересмотрели свое отношение к так называемой амилоидной гипотезе. «Я сказал бы, что она не беспочвенна, но почва эта зыбкая», — заявляет Джон Харди (John Hardy), один из участников генетического исследования, заложившего основы амилоидной гипотезы более 20 лет назад. По словам Харди, участника проекта по изучению молекулярных основ неврологических заболеваний, реализуемого в Институте неврологии при Университетском колледже Лондона, «концепция, сформулированная нами в 1998 г., была, мягко говоря, упрощением. Многие вопросы оставались без ответа, но мы полагали, что эти пробелы будут заполнены за год-другой. Однако прошло уже два десятилетия, а вопросы остаются». Впрочем, многие эксперты все же считают амилоидную гипотезу адекватной, а терапию, направленную на разрушение амилоидных бляшек, — достойной внимания.

Бета-амилоид образуется в результате расщепления его предшественника (*amyloid precursor protein, APP*) ферментами бета-секретазой и гамма-секретазой. В норме бета-амилоидные фрагменты впоследствии расщепляются, но у пациентов с болезнью Альцгеймера они концентрируются вблизи нейронов. Вдобавок в самих нейронах образуются скопления другого белка, тау. Эти процессы в конце концов приводят к гибели нервных клеток и дегенеративным изменениям головного мозга. Отсюда возникает мысль, что виной всему — бета-амилоидный белок. Кроме того, у людей с наследственной формой болезни один из трех генов, кодирующих APP и два компонента бета-секретазы, названные пресенилинами, содержит мутации. Клетки головного

мозга у них испытывают затруднения с избавлением от бета-амилоида. Другие свидетельства в пользу роли амилоида связаны с исследованиями генетических основ синдрома Дауна. У больных с таким синдромом присутствует дополнительная 21-я хромосома, несущая ген *APP*, и в их организме синтезируется избыточное количество данного белка. Для них также характерен высокий риск развития деменции к 50 годам. Все эти открытия привели ученых к заключению, что к развитию болезни Альцгеймера причастно отсутствие механизма избавления от амилоида.

Однако многочисленные неудачи с попытками лечения больных, основанными на амилоидной гипотезе, привели к выводу, что самой по себе такой терапии недостаточно. Накопление бета-амилоида происходит годами, и за это время никакие симптомы еще не проявляются, так что потенциальный больной может умереть совсем по другой причине. В феврале этого года закончились неудачей клинические испытания на больных с рано проявляющейся, наследственной формой болезни двух противоамилоидных препаратов, непосредственно влияющих на метаболизм амилоида: соланезумаба (фирмы *Eli Lilly*) и гантанерумаба (фирмы *Roche*).

Все сказанное выше, а также результаты, полученные в Совместном исследовании болезни Альцгеймера (*Alzheimer's Disease Cooperative Study*) при участии Национального института по проблемам старения США, заставляет предположить, что образование амилоидных бляшек — только один из этапов сложного каскадного процесса. «Наш опыт работы с различными способами воздействия на патологию однозначно говорит об этом, — заявляет Хауард Фелдман (Howard Feldman), профессор Калифорнийского университета в Сан-Диего, руководитель упомянутого исследования. — Трудно представить, что за столь сложное заболевание отвечает только амилоид. Амилоидная гипотеза может быть справедлива для рано проявляющихся, генетически обусловленных форм заболевания, при поздно проявляющихся формах в игру

вступают множество других факторов, и основанные на этой гипотезе подходы к лечению вряд ли годятся».

Ряд исследователей, в числе которых Карен Дафф (Karen Duff) из Колумбийского университета, придерживаются той точки зрения, что какую-то роль играет белок тау, скопления которого по размерам могут превышать бляшки из бета-амилоида. Об этом, в частности, свидетельствует тот факт, что выраженность тау-патологии коррелирует с серьезностью когнитивных расстройств более тесно, чем это имеет место при бета-патологии.

Высказывается также предположение о важной роли воспалительных процессов или наличии дефектов в гематоэнцефалическом барьере. Однако, по словам Фелдмана, терапию, нацеленную на устранение тау-патологии или воспаления, пока нельзя назвать эффективной. По его мнению, оптимальный подход состоит в применении разных способов воздействия на процесс.

Есть и другие идеи по этому поводу. В последние годы Харди с коллегами пришли к заключению, что болезнь Альцгеймера при позднем ее проявлении наряду с другими нейродегенеративными заболеваниями становится результатом дефекта в механизме реакции организма на специфические повреждения. Они полагают, что накопление бета-амилоида на ранних стадиях процесса приводит к повреждению мембран нервных клеток, и если клетки микроглии не способны их устранить, то это может помешать эффективному выведению амилоида и привести к запуску процесса разрушения клеток. В пользу данной идеи говорят результаты секвенирования ДНК больных: большинство генов — индикаторов риска опосредуют метаболизм микроглии, а остальные кодируют белки, участвующие в образовании и репарации клеточных мембран.

Тем не менее некоторые исследователи по-прежнему считают, что амилоид играет главную роль в патогенезе болезни Альцгеймера, поскольку целый ряд исследований свидетельствуют о связи степени его

агрегации с тяжестью симптомов. «Я полагаю, что амилоидная гипотеза вполне адекватна, — говорит Дэвид Хольцман (David Holtzman), заведующий кафедрой неврологии в Медицинской школе Университета Вашингтона в Сент-Луисе. — Амилоид несомненно причастен к развитию болезни. Вопрос только в том, как использовать этот факт для лечения больных».

Харди настроен в этом отношении более скептически, чем несколько десятков лет назад: он отмечает, что сегодня имеются веские данные против ключевой роли амилоида, а нацеленные на разрушение его скоплений препараты неэффективны, поскольку назначаются слишком поздно. «Предположим, что у меня случился инфаркт миокарда. Возможно, статины в моем случае помогли бы, но принимать их следовало задолго до инфаркта», — говорит он. В конце концов клиницисты научатся выявлять генетические, гематологические и спинномозговые маркеры, позволяющие оценивать риск развития болезни Альцгеймера и предупреждать ее.

Высказывается мнение, что амилоид — как раз один из таких биомаркеров. «Амилоид — очень ценный маркер для предсказания риска и своевременной постановки диагноза, — говорит Дениз Парк (Denise Park), заведующая кафедрой нейробиологии в Техасском университете в Далласе. — Я не думаю, что сегодня кто-либо может предложить что-то более адекватное».

Заглядывая вперед, можно сказать: маловероятно, что от амилоидной гипотезы откажутся вообще. Но со временем представления об этом столь губительном для умственных способностей человека заболевании пополнятся новыми знаниями, что приведет к правильному пониманию положения вещей. ■

Таня Льюис (Tanya Lewis) — редактор разделов здравоохранения и медицины в журнале *Scientific American*.

Перевод: Н.Н. Шафрановская



Одно поразительное открытие, которое важно для понимания способности таких белков уклоняться от разрушения, заключается в том, что тау-белок может перемещаться из клеток в межклеточное пространство и оттуда захватывается соседними клетками. Зачем это нужно — неизвестно. Нормально ли, что клетки обмениваются друг с другом этим белком, или же клетки выбрасывают аномальный тау-белок, чтобы избавиться от токсичного вещества? Мы полагаем, что при болезни Альцгеймера по крайней мере часть тау-белка вне клеток уже имеет неправильную конформацию. Мы считаем так потому, что когда такой белок попадает в соседнюю клетку, его неверная конформация образует затравку и другие тау-белки в этой клетке начинают принимать аналогичную аномальную форму. Когда тау-белок распространяется

по соседним клеткам, тау-белки в них копируют форму вошедшего тау-белка.

по соседним клеткам, тау-белки в них копируют форму вошедшего тау-белка.

Поскольку тау-белок бывает вне клеток, было высказано предположение, что его можно перехватить и нейтрализовать с помощью антител, введенных пациенту. Но вряд ли данный подход будет эффективен, пока мы не знаем, как именно деформирован тау-белок в тот момент, когда он наносит повреждения. Знать точную структуру необходимо для создания высокоспецифичного антитела. Другой открытый вопрос — где именно в сложном пространстве между клетками находится тау-белок, а конкретно — движется ли он через синапсы, с помощью которых нейроны обмениваются сигналами? Синаптическая щель узкая и плохо доступна для антител. Возможно, перспективнее было бы разобраться, как именно тау-белок выделяется из клеток и с помощью каких рецепторов его захватывают соседние клетки. В моей лаборатории недавно были проведены эксперименты, которые, вероятно, выявили один из таких рецепторов.

При болезни Альцгеймера что-то идет неправильно и клетка мозга остается со своими сгустками тау-белка и амилоида, которые в дальнейшем сдавливают или повреждают ее. Таким образом, мы могли бы узнать очень многое о патологических процессах при болезни Альцгеймера, если бы разобрались в деталях систем удаления аномальных белков. Нам необходимо изучить специфические различия в работе этих систем в разных подтипах нейронов и точнее разобраться в механизме, с помощью которого системы утилизации распознают аномальные белки. Нарушение конформации таких белков, как тау-белок, не происходит одновременно. В белках могут содержаться ошибки, приводящие к накоплению изменений и нарушению конформации, вследствие чего белки постепенно могут слипаться в более крупные скопления. Когда этот процесс запустился, в какой момент контролируемые системы включаются и распознают аномальность белков? Разобравшись глубже в этих процессах, мы могли бы использовать более продуманный подход для лечения и фармакологического вмешательства.

Выявление изменений в белках

Среди главных недавних достижений в исследовании болезни Альцгеймера — получение чрезвычайно детального изображения аномального тау-белка внутри клетки, спутанного в нейрофибрилярный клубок. На этом знаменитом изображении, опубликованном в 2017 г. в журнале *Nature*, показаны тысячи тау-белков, объединенных попарно и плотно сцепленных в C-образную

структуру. Вероятно, из детального изображения этого плотного образования можно получить информацию, необходимую для создания небольших молекул, которые проникали бы в промежутки между аномальными белками и раздвигали бы их, нарушая патологический процесс.

Однако разрушить эти структуры сложно по многим причинам, в том числе потому, что этот клубок довольно прочный. Более перспективным направлением могло бы быть определение последовательности микроскопических событий, благодаря которым тау-белки из своего обычного жидкого состояния переходят в более жесткое и твердое, наблюдаемое на полученном изображении, и выявление тех модификаций тау-белка, которые формируют предрасположенность к подобным изменениям.

Превращение из жидкого состояния в твердое называется фазовым переходом. В настоящее время растет интерес биологов к переходам такого рода в живых клетках, поскольку это может иметь значение при заболеваниях. Физики уже много лет изучают фазовое расслоение, например собирание вместе капель масла в воде. И масло и вода — жидкости, однако они не смешиваются из-за соотношения сил притяжения и отталкивания. Преимущество фазового расслоения для живых клеток — в возможности сконцентрировать определенный набор молекул в одном месте, что обеспечивает определенную клеточную активность. Например, в статье 2018 г. в журнале *Science* показано, что несколько белков могут скапливаться рядом с геном, чтобы контролировать работу этого гена. Такой процесс не дает белкам рассеиваться: хотя они все еще находятся в жидком состоянии, они удерживаются вместе, как капля, с помощью слабых физических сил. Это позволяет наборам белков перемещаться и работать вместе, и клетке не нужно тратить ресурсы, чтобы упаковывать их вместе в мембранную оболочку.

Некоторые белки, такие как тау, плотно прижаты друг к другу, когда находятся в капле, и высокая концентрация может содействовать их агрегации в клубок. Белки, способные образовывать такие капли, имеют общее свойство, которое называется «нативная неупорядоченность» (*intrinsic disorder*). Подобно греческому богу Протею, они могут принимать много разных форм — в отличие от более «упорядоченных» белков, у которых может быть лишь несколько определенных форм. Разные формы соответствуют разным уровням энергии. Иногда нативно неупорядоченные белки сворачиваются в такую низкоэнергетическую форму, что не могут из нее выйти, и это существенно увеличивает их жесткость. В такой ситуации может усугубляться их склонность связываться друг с другом.

Клетки упаковывают белки и другие молекулы, склонные к фазовым переходам, в немембранные

органеллы — стрессовые гранулы и РНК-гранулы. Когда определенные белки и РНК слипаются в таких гранулах, они плотно упаковываются, но обычно остаются в жидком состоянии. Однако при определенной плотности они могут получить предрасположенность слипаться еще сильнее и переходить в твердое состояние, что повышает их способность вызывать повреждения в мозге и затрудняет для клетки их выведение. Поэтому нам нужно лучше понимать, какие именно условия запускают такой процесс.

Влияние генов

У людей среднего возраста болезнь Альцгеймера может возникнуть из-за мутаций в трех генах (*APP*, *PSEN1* и *PSEN2*), которые вызывают раннюю семейную форму заболевания — это ужасное наследство, передающееся из поколения в поколение. Но в подавляющем большинстве случаев болезнь

У людей среднего возраста болезнь Альцгеймера может возникнуть из-за мутаций в трех генах, которые вызывают раннюю семейную форму заболевания, но в подавляющем большинстве случаев болезнь Альцгеймера проявляется у людей старше 65 лет и не связана с этими генами

Альцгеймера проявляется у людей старше 65 лет и не связана с этими генами. Проанализировав десятки тысяч геномов, на текущий момент генетики обнаружили другие ДНК-мутации, около двух десятков генетических вариантов, которые действительно немного повышают риск. Среди них наибольшее влияние оказывает вариант *e4* гена *APOE*. Присутствие сразу нескольких генетических вариантов (аллелей), связанных с повышенным риском, увеличивает вероятность развития заболевания. (Поскольку наличие определенных вариантов часто связано с этнической принадлежностью, чтобы давать надежную оценку генетического риска для всех популяций, нам нужно получить гораздо более широкий набор данных,

а в настоящее время большинство сведений и генетических анализов получены при исследовании людей европейского происхождения.)

Каждый из этих генетических вариантов дает начало отдельному пути для возможных исследований того, как маленькое изменение в нашем геноме может повысить вероятность развития болезни Альцгеймера. Некоторые, наиболее часто встречающиеся варианты и, соответственно, наиболее интересные пути — это изменения в генах или других участках ДНК, работающих в микроглии. В 2019 г в журнале *Science* было опубликовано исследование, в котором, изучая эти клетки иммунной системы, специалисты обнаружили связанный с развитием болезни Альцгеймера вариант гена *BIN1*. В норме этот ген влияет на то, как микроглия поглощает из межклеточной среды потенциально вредные молекулы и забирает их внутрь, защищая соседние нейроны. Эта аллель гена может влиять на то, насколько эффективно микроглия забирает неуместные белки.

В микроглии и других клетках влияние определенных аллелей связано еще и с полом и возрастом. Существуют различия между мужчинами и женщинами в экспрессии генов, расположенных на 22 парах аутосом и на половых хромосомах. С влиянием этих аллелей может быть связан больший риск болезни Альцгеймера у женщин, причем ситуация сохраняется даже при поправке на большую продолжительность жизни у женщин (см.: «Связь с менопаузой», с. 18). Слабые влияния каждой связанной с болезнью Альцгеймера аллели в целом, вероятно, обусловлены их небольшим вкладом в индивидуальные различия при обработке скопления амилоида и тау-белка. Нам надо хорошо разобраться, как влияют эти генетические варианты и почему.

Подавление воспаления

Когда в мозге обнаруживается источник повреждений, такой как амилоидные бляшки или нейрофибрилярные клубки из тау-белка, подается сигнал тревоги, выделяется множество молекул иммунной системы, которые называются цитокины, и разные клетки начинают атаку. Этот ответ в значительной степени запускается микроглией, и в итоге возникает воспалительная реакция с целью разрушить любые ткани, в которых скрываются проблемные очаги. Эта грубая «врожденная» система работает совсем иначе, чем более точная «приобретенная», которая создает иммунные клетки и антитела, реагирующие только на конкретных врагов, таких как определенные бактерии или вирусы, и обеспечивает более точную и целенаправленную защиту. При болезни Альцгеймера преобладает более обширный врожденный ответ. Когда повреждения усиливаются настолько, что внутренние процессы нервных

клеток не справляются с удалением мусора, запускается такая воспалительная реакция, при этом, к сожалению, часто поражаются и те клетки мозга, которые пока еще были здоровыми. Ученые из Калифорнийского университета в Ирвайне недавно обнаружили, что если удалить старую микроглию у пожилых мышей, то мозг животного заселяется свежей микроглией. Такое омоложение улучшило пространственную память, обратило вспять возрастные изменения в экспрессии генов нейрона, усилило образование новых нейронов и увеличило плотность их дендритов.

Повреждения, вызванные амилоидом и тау-белком, вероятно, происходят на фоне слабого воспаления в мозге, которое естественным образом запускается при старении. У многих пожилых людей повышена концентрация провоспалительных цитокинов, таких как фактор некроза опухоли (ФНО), что позволяет предположить наличие легкого вос-

У людей старение может протекать очень по-разному, и это означает, что развитие и влияние болезни Альцгеймера тоже будут сильно различаться. Некоторые из этих различий можно объяснить индивидуальными особенностями иммунной системы человека

палительного процесса во всем организме в этом возрасте. У людей старение может протекать очень по-разному, и это означает, что развитие и влияние болезни Альцгеймера тоже будут сильно различаться. Некоторые из этих различий, вероятно, можно объяснить индивидуальными особенностями иммунной системы человека. Разные люди наследуют разные варианты генов, участвующих в работе иммунной системы. Кроме того, в течение жизни на формирование нашей иммунной системы влияют ненаследственные факторы. На нас различным образом воздействуют симбиотические микробы, например кишечника, и патогенные микробы из окружающей среды. Все это означает, что генетические различия и воздействие всяческих патогенов на иммунную систему могут влиять на особенности развития болезни Альцгеймера, устанавливая определенный иммунный профиль.

Если исследователи хотят остановить повреждение мозга, вызванное обширным воспалением, им надо отличать желательные иммунные реакции, с помощью которых мозг борется с активно развивающимися проблемами и обычной возрастной деградацией, от других, более опасных иммунных реакций на прогрессирующую патологию при болезни Альцгеймера. Ученые хотели бы подавить воспаление в мозге, вызванное заболеванием, но пока не понимают, как именно это сделать.

Нарушение электрических соединений

Мозг — электрический орган. Главная его особенность — умение кодировать и переносить информацию в виде электрических сигналов, которые между нейронами передаются обычно с помощью химических веществ — нейромедиаторов. Пока недостаточно изучено, как именно болезнь Альцгеймера ухудшает передачу сигнала между клетками и нарушает их функциональные цепочки, обеспечивающие память. Но благодаря современным техническим достижениям сейчас появляется возможность выявлять в мельчайших деталях как структурные, так и функциональные связи.

Некоторые такие достижения связаны с оптогенетикой — методом, позволяющим ученым с помощью света стимулировать определенные нейроны в мозге животных. Исследователи могут предложить животному подкрепление или напугать, а затем определить, активность каких генов усилилась. Такой подход — потрясающее достижение. Он позволяет исследователям не только наблюдать, но и манипулировать с энграммами — определенными группами нейронов, кодирующими определенные воспоминания, — как сообщается в статье *Science*, вышедшей в 2020 г. Когда эти клетки после первоначального обучения стимулировали светом, воспроизводились существующие воспоминания. Если мы сможем выяснить, какие биологические механизмы управляют формированием электрических связей при запоминании, подобная информация может иметь решающее значение для понимания того, как болезнь Альцгеймера нарушает эту нервную цепочку.

Нейробиологи в этом году сделали еще один решающий шаг, обнаружив, что микроглия, по видимому, участвует в стирании энграмм, удаляя синапсы, которыми нейроны в норме связаны между собой.

Нам известно также, что некоторые из белков, участвующих в развитии болезни Альцгеймера, могут разными путями влиять на нейромедиаторы. Например, тау-белок накапливается в нейронах, которые используют нейромедиатор глутамат и передают возбуждающий сигнал. Поскольку для передачи сигналов требуется хорошая система включения и выключения, то существуют также нейроны, которые тормозят передачу,

выделяя другой нейромедиатор, ГАМК. Эти клетки меньше накапливают тау-белок. Механизм такой клеточной избирательности и ее последствия неизвестны, нам нужно разобраться в этом намного лучше. Кроме того, ученые обнаружили, что нейронная активность усиливает распространение тау-белка, что может оказаться еще одним важным элементом в головоломке болезни Альцгеймера.

Процесс заболевания по-разному влияет не только на разные типы передающих сигнал клеток, но и на разные участки мозга. Например, участки мозга, связанные с памятью, эмоциями и сном, повреждаются сильно, тогда как центры, связанные с первичными двигательными и сенсорными функциями, остаются относительно сохраненными. В одном исследовании было показано, что амилоидные бляшки в первую очередь накапливаются в участках мозга, активирующихся при свободном блуждании мыслей, в так называемой сети пассивного режима работы мозга. Но выводы надо делать осторожно: блуждание мыслей совсем не обязательно вызывает отложение амилоида.

Сон — еще одно электрическое состояние мозга, нарушение которого все чаще рассматривают в качестве фактора при развитии болезни Альцгеймера. Уровни амилоида, и тау-белка колеблются при нормальном цикле сна-бодрствования, а при недостатке сна выработка амилоида резко увеличивается, а выведение ухудшается. При глубоком сне возникают ритмичные волны в спинномозговой жидкости, которые могут помочь выведению из мозга токсинов, и в том числе амилоида. К сожалению, продолжительность глубокого сна снижается с возрастом. Это наблюдение может способствовать разработке фармакологических средств, направленных на восстановление глубокого сна.

Обмен идеями

Обновленная программа научных исследований болезни Альцгеймера, безусловно, не исчерпывается перечисленными темами, есть и другие. Но эти пять направлений взаимосвязаны и, как это часто бывает в биологии, открытия в одном из них могут быть полезными и для развития остальных. Я надеюсь, что по мере того как фундаментальная наука будет собирать недостающую информацию, особенно количественную, будут подключаться специалисты по компьютерному моделированию и теоретики, чтобы помочь спрогнозировать влияние болезни Альцгеймера на системы нервных связей и клеточные пути. Кроме того, я хотел бы, чтобы при исследовании в этих направлениях ученые совместно осмысливали информацию и делились конструктивными идеями. Таким образом мы могли бы объединиться, чтобы понять механизмы этого ужасного заболевания. ■



БУДУЩЕЕ МЕДИЦИНЫ
НОВАЯ ЭРА ДЛЯ БОЛЕЗНИ АЛЬЦГЕЙМЕРА

СВЯЗЬ С МЕНОПАУЗОЙ

Старение — самый главный фактор риска для развития болезни Альцгеймера. По данным исследований, следующий за ним фактор — женский пол. Почему?

Джена Пинкотт

София рассказывает мне о том, как начинается потеря памяти: вы появляетесь на работе, забыв, что должны быть на деловом завтраке с клиентом. Вы забываете имена ваших соседей. Затем, вскоре, вы заходите в комнату, не имея ни малейшего представления о том, зачем вы туда пришли. София — адвокат, ей немного больше 50 лет и она попросила писать о ней под псевдонимом. Она страдала от частых приливов жара и ночной потливости, характерных для менопаузы, однако забывчивость вроде бы должна быть из другой оперы. Что же происходило с ее разумом?

Возможно, ответ на вопрос знает Лиза Москони (Lisa Mosconi), руководитель Женской инициативы в области здоровья мозга и заместитель директора Центра профилактики болезни Альцгеймера в Медицинском колледже Джоан и Сэнфорда Вейл Корнеллского университета в Нью-Йорке. Она проанализировала тысячи снимков позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) пациенток с начинающейся

менопаузой и видела, как со временем меняется метаболизм их мозга. «Во время пременопаузы у вашего мозга много энергии», — рассказывает Москони, показывая мне ПЭТ-изображение мозга молодой женщины. Оно изукрашено многочисленными яркими красными и оранжевыми пятнами, соответствующими высокому уровню метаболизма глюкозы — индикатора нейронной активности. Во время



ОБ АВТОРЕ

Джена Пинкотт (Jena Pincott) — внештатный научный журналист и автор нескольких книг, в том числе «Действительно ли у любителей шоколада более сладкие дети? Удивительная наука о беременности» (*Do Chocolate Lovers Have Sweeter Babies?: The Surprising Science of Pregnancy*, 2011).



перименопаузы, которая наступает у женщин ближе к 50 годам, метаболизм глюкозы в мозге снижается на 10–15% и более — и ПЭТ-изображение меняется: вместо красных и оранжевых пятен преобладают желтые и зеленые, отражающие меньшее потребление сахара и снижение метаболизма. «Затем, в постменопаузе, метаболизм глюкозы в мозге снижается на 20–30%, а иногда и более», — рассказывает Москони, показывая мне последний снимок. Теперь территория очевидным образом захвачена зелеными пятнами.

Эстроген — главный регулятор метаболизма в молодом женском мозге, он распоряжается всем начиная от доставки глюкозы и ее поглощения и заканчивая превращением в энергию. Снимки Москони — это разноцветные доказательства того, что снижение уровня гормона во время менопаузы, которая часто начинается у женщин в возрасте 45–55 лет, приводит, как выражается Москони, к «биоэнергетическому кризису в мозге». В какой-то момент в течение этого переходного периода, длящегося семь и более лет, до 60% женщин ощущают так называемые когнитивные нарушения, связанные с менопаузой: приступы замешательства, рассеянности и забывчивости. Эти проблемы с памятью нормальны. Для образования синапсов требуется энергия, а поскольку уровень эстрогена и метаболизма глюкозы в мозге снижается, ухудшается и формирование новых связей между нейронами.

К счастью, это ухудшение временное: женщины восстанавливаются, их ум сохраняется, поскольку мозг возобновляет равновесие и находит другие источники энергии. В исследовании 2009 г. показано, что вскоре после наступления постменопаузы женщины решают когнитивные тесты так же хорошо, как и раньше. Однако через несколько десятков лет примерно у каждой пятой из них будет диагностирована болезнь Альцгеймера. Москони и другие исследователи считают, что для женщин, которых только в США с этой болезнью живет 3,6 млн, менопауза могла быть стартовой точкой для снижения когнитивных способностей.

Несмотря на то что исследования болезни Альцгеймера, в которых внимание сосредоточено именно на женщинах, стали приоритетной задачей, остаются невыясненными еще много вопросов, касающихся специфических для женщин

факторов риска, симптомов, профилактики и реакции на лечение. Почему в США у женщин шанс получить болезнь Альцгеймера к 65 годам — один из пяти, а у мужчин в том же возрасте — один из девяти? Американские женщины живут в среднем на пять лет дольше мужчин, но «долголетие не полностью объясняет большие частоту заболевания и риск приобрести его в течение жизни», — отмечает в анализе 2018 г. группа экспертов Общества исследований здоровья женщин. Почему женщины — носительницы варианта *e4* гена *APOE* (*APOE4*), который увеличивает риск развития болезни Альцгеймера, скорее приобретут это заболевание в более молодом возрасте, чем носители-мужчины? Что есть такого в женской биологии и жизненном опыте, что повышает их уязвимость?

Ответ могла бы дать гипотеза менопаузы, согласно которой снижение уровня эстрогена в этот период делает мозг более уязвимым к будущим повреждениям. Если Москони и другие исследователи правы, для предотвращения заболевания Софии и миллионам женщин во всем мире, переживающим этот период, могли бы быть полезны изменения в образе жизни и, возможно (но не точно), гормональная терапия.

Умственная деятельность при меньшем количестве эстрогена

«Это режим голодания», — говорит Роберта Диас Бринтон (Roberta Diaz Brinton), директор Центра инноваций в науке о мозге Аризонского университета, описывая происходящее при снижении эстрогена и преобладании зеленых пятен на ПЭТ-изображении мозга женщин во время менопаузы. Она объясняет, что эстроген интенсивно и разнообразно влияет на биоэнергетику мозга. К этой сигнальной молекуле есть рецепторы по всему мозгу, она регулирует митохондрии, которые генерируют энергию для клеток и подпитывают образование нервных связей. Кроме того, эстроген активизирует ферменты, обеспечивающие работу синапсов, и облегчает транспорт глюкозы из кровеносных сосудов в мозг, в нейроны и в глиальные клетки, занимающиеся поддержкой и защитой нейронов.

Исследование, которое Бринтон провела на стареющих самках мышей, показало, что, когда уровень эстрогена снижается и метаболизм глюкозы замедляется, мозг приспособливается

использовать в качестве дополнительного топлива кетоновые тела — вещества, образующиеся из жирных кислот, в данном случае из белого вещества, то есть миелиновых оболочек, защищающих нейроны. По своей сути такое переключение — это акт самопоедания, и, видимо, то же в некоторой степени происходит и у женщин, и те, чей мозг более интенсивно потребляет кетоновые тела, могут быть сильнее подвержены дегенерации белого вещества и иметь больший риск деменции.

Иногда дефицит энергии в мозге совпадает с развитием твердых отложений, то есть бляшек бета-амилоида. Временами их можно обнаружить и в нормально работающем мозге, но у всех людей с болезнью Альцгеймера они точно есть. Считается, что они мешают синаптической передаче. В мозге людей с этим заболеванием бета-амилоид обычно присутствует вместе с запутанным в клубки тау-белком, который обволакивает ядро в клетках и, очевидно, убивает их, блокируя доставку питательных веществ. Кроме того, низкий уровень эстрогена повышает проницаемость гематоэнцефалического барьера, делая мозг более уязвимым для токсинов и инфекций, которые могут стимулировать агрессивный иммунный ответ, высвобождая белки, образующие новые клубки и бляшки.

По словам Москони, в отличие от мозга женщин старше 40 и 50 лет мозг мужчин той же возрастной группы стареет незначительно и в нем реже обнаруживаются бета-амилоидные бляшки. Согласно одному из объяснений, тестостерон, как и эстроген, работает в качестве нейропротектора, и уровень тестостерона во время андропаузы никогда не падает так сильно и резко, как уровень эстрогена в менопаузе. С помощью этого различия можно объяснить, почему у мужчин заболевание встречается реже. Москони поясняет, что болезнь Альцгеймера у женщин может начинаться раньше, чем у мужчин, но хорошо компенсироваться, и поэтому заболевание диагностируют уже на более поздней стадии. В исследовании 2019 г. выяснилось, что среди людей с признаками болезни Альцгеймера на ПЭТ женщины лучше мужчин справляются с тестами на вербальную память. Если бы при тестировании использовались разные пороговые значения для женщин и мужчин, заболевание можно было бы обнаружить раньше, когда лечение более эффективно.

Для того чтобы в дальнейшем выявлять женщин из группы риска, исследователи приступили к изучению связи между болезнью Альцгеймера и воздействием эстрогена в течение жизни. Ученые оценивают воздействие эстрогена по продолжительности «репродуктивного периода» — временного промежутка между первой и последней менструациями. Как показало крупномасштабное исследование с участием 15 754 женщин, обслуживаемых медицинской организацией *Kaiser Permanente*,

у женщин с репродуктивным периодом длительностью 21–34 года на 26% выше риск развития деменции по сравнению с женщинами, имеющими репродуктивный период 39–44 лет. Следовательно, при позднем начале менструаций или ранней менопаузе риск заметно возрастает. Однако на интенсивность эстрогенового воздействия в течение жизни влияют многие факторы — и их влияние недостаточно изучено. Например, уровень эстрогена при беременности значительно повышается, но после родов падает и в течение нескольких лет остается на более низком уровне, чем у женщин, которые никогда не были беременны. Однако исследования, в которых пытались связать количество родов с риском развития болезни Альцгеймера, дали противоречивые результаты. Во всем мире более 100 млн женщин принимают противозачаточные таблетки, которые подавляют гормональную активность яичников, однако об их долгосрочном влиянии на риск развития деменции известно крайне мало.

Дилемма гормональной терапии

София, которая никогда не рожала детей и принимала противозачаточные средства с момента половой зрелости, говорит, что нарушения памяти у нее достигли пика в последний год перименопаузы. У нее часто было более трех приливов жара в час — такие частота и серьезность симптомов коррелируют с сильным нарушением метаболизма глюкозы в мозге, большей потерей белого вещества и в дальнейшем потенциально повышенным риском развития деменции. Врач Софии выписал ей новые таблетки — комбинированный эстроген-прогестинный препарат (прогестин защищает матку). По словам Софии, эффект был чудесным: приливы жара прекратились, и внезапно она снова начала помнить о деловых завтраках с клиентами.

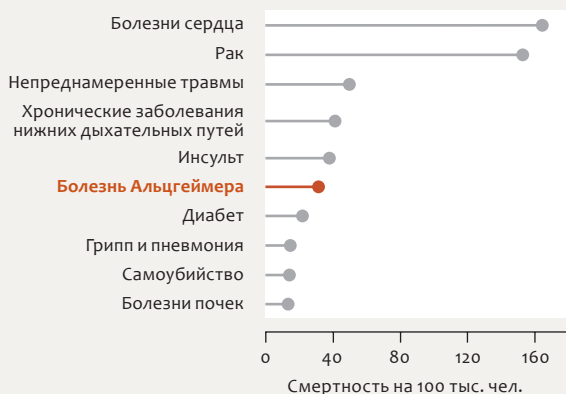
Может показаться, что каждой женщине во время менопаузы нужна гормональная терапия просто для поддержания здоровья мозга, но на самом деле все сложнее. В начале 2000-х гг. Национальный институт сердца, легких и крови сообщил результаты, полученные в рамках проведенного ими крупномасштабного исследования «Инициатива по охране здоровья женщин» (*Women's Health Initiative*) и дополнительного исследования памяти. Оказалось, что гормональная терапия (обычно это сочетание эстрогена и прогестина) связана с повышенным риском рака молочной железы, инсульта, сердечных заболеваний, тромбов и, что совершенно неожиданно, в два раза повышает риск развития деменции. С тех пор ученые выявили слабые места в этом исследовании. Женщинам назначали конъюгированный лошадиный эстроген, полусинтетическое вещество, считающееся более слабым нейропротектором, чем обычно применяемый в наше время *17β*-эстрадиол. Но главная проблема

Страдающие от болезни Альцгеймера

Смертность

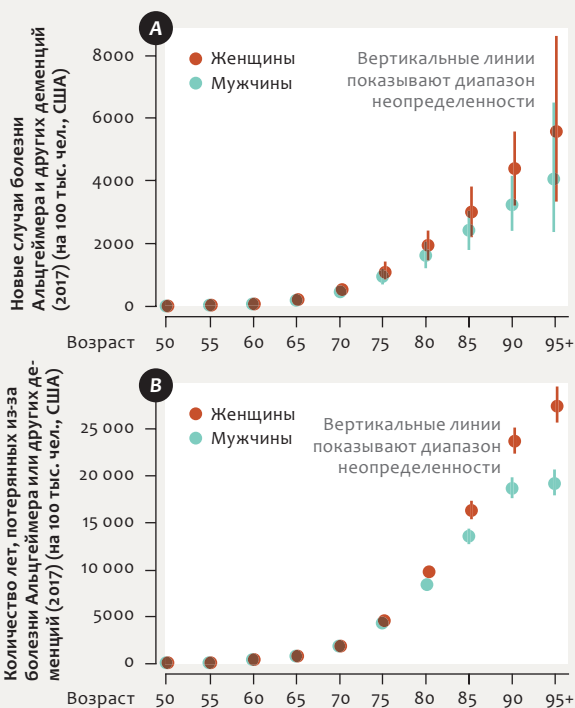
В США болезнь Альцгеймера занимает шестое место среди причин смерти, и эксперты отмечают, что эти данные могут быть занижены, поскольку в свидетельстве о смерти часто указывается непосредственная причина, например пневмония, а не вызвавшая ее деменция.

Десять основных причин смерти в США (2017) (смертность стандартизирована по возрасту)



Гендерные различия

По данным Института медицинских показателей и оценок, женщины в США страдают от болезни Альцгеймера чаще, чем мужчины. В период с 50 до 95 лет среди вновь диагностированных случаев доля женщин становится все больше **A**. Аналогично увеличивается разрыв между женщинами и мужчинами, если оценивать суммарное количество лет, потерянных из-за инвалидности или преждевременной смерти, по сравнению со средней продолжительностью жизни **B**.



заклучалась в том, что на момент назначения гормональных препаратов женщинам было 65 лет и более.

Возраст, в котором женщина принимает первую таблетку гормонального препарата (или впервые использует крем, кольцо или пластырь), имеет принципиальное значение для того, что Бринтон называет «здоровой реакцией клеток на эстроген». Если нейроны здоровы, они реагируют на эстроген. Если нейроны стареют или лишены эстрогена слишком долго, они перестают реагировать на гормон, поскольку сигнальные пути повреждаются и рецепторы перестают работать. В этом случае введение эстрогена может усилить деградацию нервной системы. Поэтому, чтобы гормональные препараты приносили пользу, а не вред, их надо начать принимать в так называемый критический период, обычно это пять лет после последней менструации, поясняет Бринтон.

В нескольких исследованиях пытались проверить гипотезу о критическом периоде на пациентах, принимавших гормональные препараты на протяжении как минимум десяти лет. В исследовании, проведенном в штате Юта, терапия была начата в течение пяти лет после наступления менопаузы. В результате наблюдалось снижение риска развития болезни Альцгеймера на 30%. В то же время в проведенном недавно финском исследовании риск увеличился на 9–17% и, по-видимому, не зависел от возраста начала лечения. Каким результатам верить? Ученые не знают. Хотя они считают, что гормональная терапия эффективна и безопасна для многих женщин в начале менопаузы, насчет защиты от деменции единого мнения нет: по-видимому, вопрос осложняется наличием целого ряда факторов. «Необходимы дополнительные клинические испытания, — говорит Москони, — особенно на женщинах, которые начали прием гормональных препаратов еще во время перименопаузы». Возможно, женщины с наиболее тяжелыми симптомами во время перименопаузы, такие как София, не могут естественным образом приспособиться к снижению уровня эстрогена и у них гормональная терапия может предотвратить развитие нейродегенеративных повреждений при переходе к менопаузе.

София говорит, что не рискнет прекращать прием гормональных препаратов. Она чувствует, что они спасли ее от прогрессирующей потери памяти, которая поразила бы ее так же, как ее бабушку, любящую и волевою женщину, ставшую бестолковой и настороженной под влиянием болезни Альцгеймера. София не делала анализ на ген *APOE4*, поэтому неясно, действительно ли у нее развилось бы это заболевание, как нет и исследований, подтверждающих, что гормональная терапия помогает предотвращению болезни. Тем не менее София убеждает меня, женщину немного за 40: «Как

только понадобится, сразу же начните лечение». Но ведь наверняка есть лучший способ предотвратить болезнь Альцгеймера?

Уязвимый период

Менопауза сама по себе не вызывает болезнь Альцгеймера. Менопауза — это период уязвимости, особенно для женщин с предрасположенностью, рассказывает Бринтон. На первый взгляд, ее связь с болезнью Альцгеймера неочевидна. В среднем менопауза наступает у женщин в 51 год, а болезнь Альцгеймера диагностируют в 70–75 лет, то есть разрыв составляет около 20–25 лет. Но так называемая продромальная фаза между первыми признаками патологического процесса, такими как бета-амилоидные бляшки, и полномасштабными когнитивными нарушениями также составляет около 20 лет. «Может быть, это совпадение, — говорит Бринтон. — Но я так не думаю».

Помимо сканирования мозга, можно ли каким-то еще способом предсказать риск развития болезни Альцгеймера у женщины заранее, пока она еще здорова? В исследовании, опубликованном в 2016 г., Бринтон с коллегами разделили 500 здоровых женщин, находящихся в постменопаузе, на три группы: с оптимальным метаболизмом, с высоким давлением крови, но на границе нормы, и со сниженным метаболизмом на границе нормы. Только одна из этих групп набрала значительно меньше баллов в тестах, оценивающих вербальную память, — группа женщин с погранично низким уровнем метаболизма.

Формально метаболические показатели этих женщин все еще оставались в границах нормы. И все же имелись признаки того, что их здоровье начало ухудшаться. Во-первых, уровень глюкозы в крови у этой группы был близок к пороговому для преддиабета — состояния, наблюдаемого примерно у 30% женщин, которое само по себе связано с когнитивными нарушениями. После приема пищи гормон инсулин помогает клеткам получить глюкозу для образования энергии, однако у людей с преддиабетом клетки начинают терять восприимчивость к инсулину. Когда клетки мозга становятся нечувствительными к инсулину, они поглощают глюкозу, но не могут правильно отреагировать на нее, и ситуация дополнительно ухудшается при снижении глюкозного метаболизма в менопаузе, что может способствовать нейродегенерации. У многих женщин преддиабет на этом переходном этапе затем перерастает в диабет второго типа, который почти удваивает риск развития болезни Альцгеймера. Более 80% пациентов с этим заболеванием имеют инсулинорезистентность.

Если говорить о менопаузе и о снижении уровня эстрогенов как об изменении экологии всего организма, нетрудно увидеть, как большой набор факторов может способствовать развитию болезни

Альцгеймера и почему контроль над этими факторами важен для профилактики. Эстроген поддерживает здоровье, влияя на сердечно-сосудистую систему, и в том числе участвует в регуляции холестерина: он повышает уровень «хорошего» холестерина — ЛПВП (липопротеидов высокой плотности) и снижает уровень «плохого» холестерина — ЛПНП (липопротеидов низкой плотности), который вызывает накопление жировых отложений в артериях. Ген *APOE* связан с метаболизмом холестерина и транспортирует его к нейронам. Носители аллели *e4* имеют естественно более высокие уровни ЛПНП в крови и сопутствующий этому артериосклероз. При воспалительном процессе эти отложения отслаиваются, что приводит к «немым инсультам», которые более чем в два раза увеличивают риск развития болезни Альцгеймера и других форм деменции.

Сон тоже играет ключевую роль в регуляции метаболизма и в том числе влияет на чувствительность к инсулину, и дефицит сна воздействует на женщин значительно сильнее, особенно во время менопаузы. Во время обычного ночного отдыха глиальные клетки выводят бета-амилоид и таубелки. При недостатке сна этот процесс нарушается, белки накапливаются и образуют бляшки, из-за чего сон становится фрагментарным, вызывая ухудшение метаболизма глюкозы, что в свою очередь мешает сну и так далее, возникает пагубный цикл, ускоряющий процессы нейродегенерации. И тут *APOE4* повышает риск: у носителей снижена способность выводить и разрушать бляшки и клубки.

Стресс во время менопаузы тоже может сыграть критическую роль. В ходе долговременного 35-летнего исследования выяснилось, что чем больше стрессогенных факторов в течение месяца и более влияло на женщин 40–60 лет, тем с большей вероятностью четыре десятилетия спустя у них будет болезнь Альцгеймера. Помимо стресса, женщины чаще мужчин жалуются на депрессию, которая связана с повышением риска деменции почти вдвое. Неудивительно, что женщины — носительницы *APOE4*, у которых уже есть сильная генетическая предрасположенность к болезни Альцгеймера, в четыре раза более склонны к клинической депрессии по сравнению с теми, у кого нет этой аллели; вероятно, так происходит из-за того, что в областях мозга, участвующих в регуляции эмоций, увеличивается количество бета-амилоидных бляшек.

Диапазон возможностей

В 2019 г. Бринтон с коллегами опубликовали продолжение исследования метаболических индикаторов, на этот раз рассматривая варианты *APOE* в качестве переменной. Аллель *APOE4* присутствует примерно у 25% жителей США, и люди с одной

копией этого варианта имели больше шансов получить болезнь Альцгеймера и составляли примерно 40% от общего числа случаев заболевания. Среди носителей у женщин этот недуг развивается гораздо раньше, чем у мужчин, между 65 и 75 годами, — вероятно, за счет утраты нейропротекторного влияния эстрогена. У носителей выше уровень ЛПНП, больше бета-амилоидных бляшек и тау-клубков, меньше объем гиппокампа и сильнее снижена плотность нейронных связей по сравнению с теми, у кого нет этой аллели. При снижении метаболизма глюкозы во время менопаузы женщины с вариантом *e4* интенсивнее используют кетоновые тела в качестве вспомогательного топлива для мозга.

Как и в предыдущем исследовании Бринтон, группа риска с худшим метаболическим здоровьем имела меньше баллов в когнитивных тестах. Но на этот раз анализ показал, что низкий уровень выполнения у группы получался в основном за счет носителей *APOE4*. Среди носителей высокий уровень холестерина и другие эффекты плохого метаболического здоровья усиливали негативное влияние *APOE4*, приводя к раннему ухудшению когнитивных способностей. Однако после того как носители из группы с плохими результатами теста проходили гормональную терапию, их метаболическое здоровье улучшалось, так же как и баллы в некоторых когнитивных тестах.

Бринтон рассматривает носительство *APOE4* как «тревожный сигнал, а не смертный приговор»: у многих женщин с *APOE4* нет заболевания. В ее исследовании в группе с оптимальным метаболическим здоровьем и лучшими результатами когнитивных тестов были и носители аллели предрасположенности к болезни Альцгеймера. Может быть, этим женщинам, так же как здоровым участникам без вредного генетического варианта, удалось лучше компенсировать «биоэнергетический кризис» во время менопаузы? Компенсировала ли их физическая форма другие факторы риска?

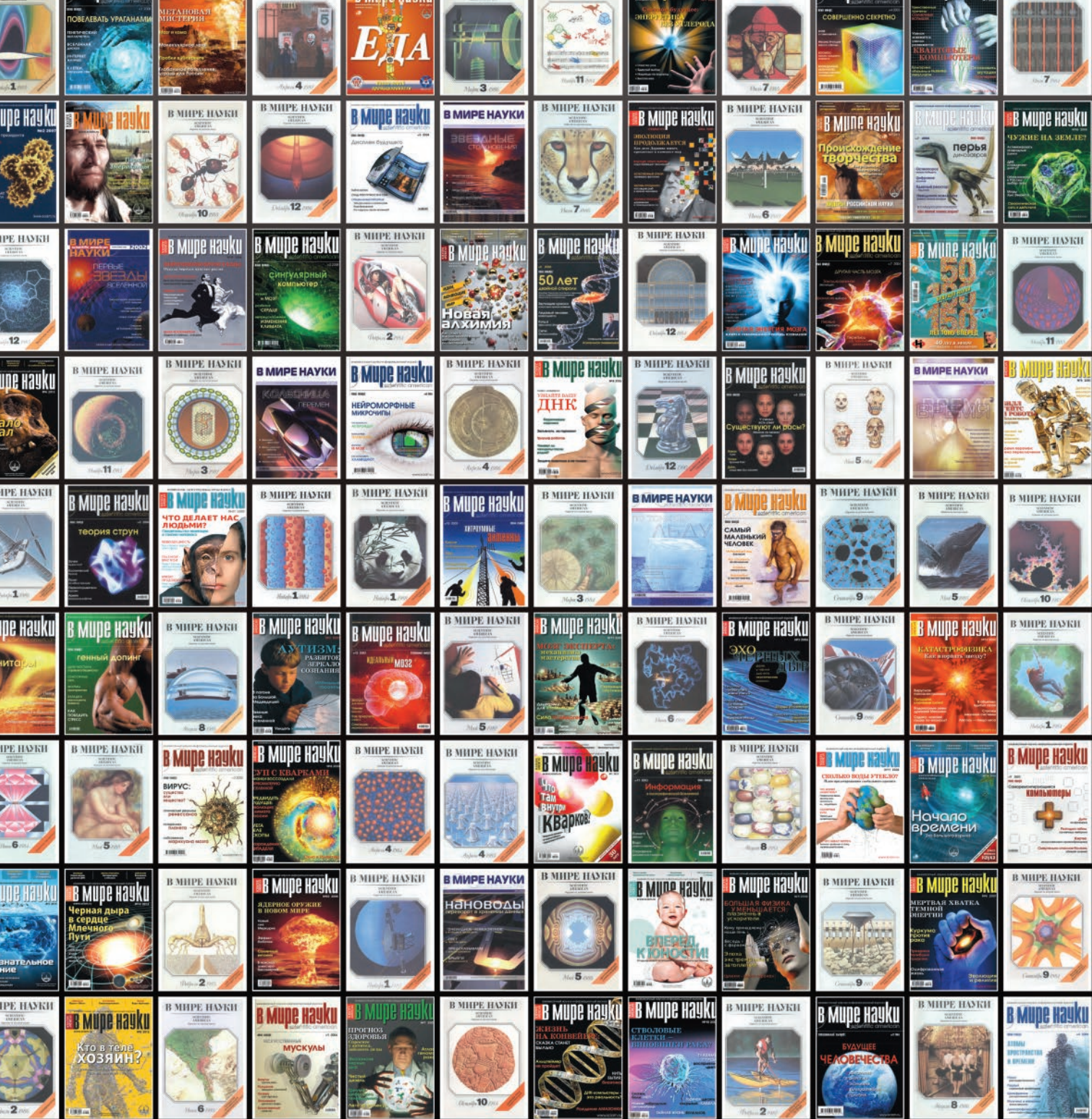
Согласно часто цитируемому сообщению, опубликованному в 2017 г. в журнале *Lancet*, как минимум треть случаев болезни Альцгеймера связаны с диабетом, ожирением, плохим питанием и другими факторами, которые можно предотвращать и лечить. «Главная идея в том, что поддержание метаболического здоровья поддерживает и когнитивное здоровье, — заключает Бринтон. — Вы не можете поменять свой возраст, хромосомный пол или варианты генов. Но вы можете изменить свое метаболическое здоровье и, соответственно, степень риска». С этим согласна и Москони. Она говорит, что все, особенно женщины 40–60 лет, должны «знать свои данные», то есть аллели *APOE*, метаболический профиль, биохимические показатели крови и даже результаты сканирования мозга, особенно если используются

новые биомаркеры, учитывающие пол. «Я надеюсь, что сканирование мозга в профилактических целях станет частью клинического обследования для всех женщин (и мужчин) среднего возраста, так же как сейчас мы проверяем грудь и матку», — говорит Москони. Слово «профилактика», которое раньше редко ассоциировалось с болезнью Альцгеймера, теперь повторяется постоянно.

Вопрос об использовании гормональной терапии остается спорным. Но, по словам Бринтон, в гормональную терапию приходит точная медицина, в которой используют генетические тесты и анализ данных, и вскоре врачи смогут назначать лечение, основываясь на биомаркерах риска, таких как аллели *APOE*, репродуктивный анамнез, симптомы менопаузы и другие факторы. Нейробиолог Карин Фрик (Karyn Frick) из Висконсинского университета в Милуоки вместе со своими коллегами создала «упрощенную» версию 17β -эстрадиола, которая предположительно снижает риск развития рака молочной железы, связанный со стандартной гормональной терапией. Этот препарат еще не прошел клинических испытаний, но дал многообещающие результаты в исследованиях на мышах. Фрик говорит, что он улучшал память.

Для тех случаев болезни Альцгеймера, которые невозможно предотвратить, лаборатория Бринтон разработала лекарство под названием *Allo* на основе аллопрегнанолона, естественного стероида, стимулирующего образование новых нейронов. На мышинной модели Альцгеймера это лекарство прекратило когнитивные ухудшения и улучшило обучение и память. Многообещающие результаты получены в первой фазе клинических испытаний, у пациентов с легкой деменцией восстанавливался объем серого вещества в гиппокампе и тормозился воспалительный процесс в мозге. По словам Бринтон, вторая фаза клинических испытаний с участием носителей аллели *APOE4* финансируется Национальным институтом по проблемам старения и должна начаться во второй половине 2020 г.

В 2016 г. Национальные институты здоровья начали требовать, чтобы в исследованиях, которые они финансируют, пол учитывали в качестве биологической переменной. Болезнь Альцгеймера развивается медленно, поэтому пройдут годы, прежде чем женщины смогут извлечь пользу из новых исследований об изменениях во время менопаузы. А профилактика необходима уже сейчас: рекомендуются растительная диета с низким содержанием сахара, трансжиров и насыщенных жиров, физические упражнения, снижение стресса, семичасовой ночной сон для очищения от бета-амилоида и тау-белка, особенно для женщин среднего возраста. «Женщины заботятся о других, откладывая заботу о себе, — говорит Бринтон. — Но откладывать заботу о здоровье нельзя». ■



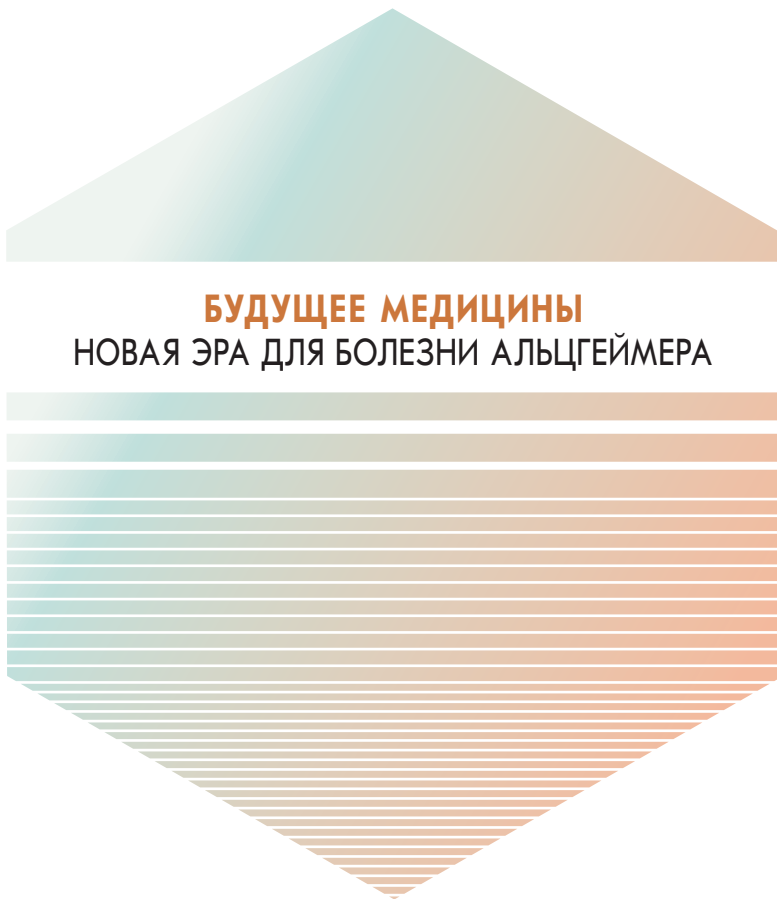
Хотите знать о науке больше?

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





БУДУЩЕЕ МЕДИЦИНЫ

НОВАЯ ЭРА ДЛЯ БОЛЕЗНИ АЛЬЦГЕЙМЕРА

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

Мелкие частицы, попавшие в воздух вместе с выхлопными газами автомобилей и из других источников, оказались тесно связанными с риском развития болезни Альцгеймера. В недавних исследованиях показано, как такие частицы могут перемещаться из легких в мозг

Эллен Рунпел Шелл



ОБ АВТОРЕ

Эллен Руппел Шелл (Ellen Ruppel Shell) — журналистка и профессор журналистики, специализирующаяся на естественных науках, экономике и обществе. Ее последняя книга — «Профессия: работа и ее будущее в эпоху радикальных перемен» (*The Job: Work and Its Future in a Time of Radical Change*, 2018). Она автор статьи «Ожирение и мозг» в нашем журнале (ВМН, № 12, 2019).



М

ой первый день в Мехико оказался очень тяжелым. Смог был таким густым, что я задыхалась, поднимаясь по лестнице в свой гостиничный номер. Я была готова к головной боли от высокогорья и разреженной атмосферы, но не ожидала воспаления в глазах и жжения в легких из-за грязного воздуха.

В 1992 г. ООН объявила Мехико самым загрязненным мегаполисом, и с тех пор город усердно пытался очиститься. Это дало свои результаты: город может по праву гордиться километрами велодорожек и пышными парками. Однако если взглянуть на задымленный горизонт, становится ясно, что усилий еще не достаточно. Большую часть года содержание частиц сажи и других загрязнителей в воздухе значительно превышает допустимое по стандартам ВОЗ. Мехико с его более чем 9,6 млн автомобилей и примерно 50 тыс. дымящих труб погружен в ядовитое варево, разрушающее человеческие легкие и сердца. Сейчас многие ученые считают, что подобное загрязнение повреждает также и мозг.

В исследовании 2018 г. ученые из институтов Мексики и США обнаружили признаки, характерные для болезни Альцгеймера, в мозге относительно молодых (30–40 лет) жителей Мехико, то есть за десятилетия до того, как такие признаки обычно выявляются. Ученые связали эти нарушения с воздействием загрязненного воздуха. Авторы также обнаружили ранние формы пугающих повреждений у младенцев и детей младшего возраста. Мехико — не единственный город, где загрязнение воздуха связано с болезнью Альцгеймера. Всего несколько лет назад группа ученых из Гарвардского университета опубликовала данные большого исследования 10 млн участников программы *Medicare* в возрасте от 65 лет, проживающих в 50 разных городах на северо-востоке США. Исследователи отметили сильную корреляцию между некоторыми загрязнителями воздуха и числом нейродегенеративных заболеваний, в том числе и болезни Альцгеймера.

Схожие результаты получены в исследованиях, проведенных в Англии, Швеции и других странах, а также на Тайване. Нейробиолог из Техасского университета в Сан-Антонио и главный редактор *Journal of Alzheimer's Disease* Джордж Перри (George Perry) говорит, что «в исследованиях болезни Альцгеймера загрязнение воздуха становится одной из самых изучаемых тем». По словам Перри, хотя многие десятилетия внимание ученых было направлено на генетику и накопление поврежденных белков бета-амилоидов как на причины, вызывающие заболевание, сейчас многие специалисты соглашаются, что важную роль играет и загрязнение воздуха. С этим мнением согласен и токсиколог Масаси Китадзава (Masashi Kitazawa), специализирующийся на загрязнении окружающей среды, из Калифорнийского университета в Ирвайне. По разным оценкам исследователей, от 40% до 65% риска возникновения самой распространенной формы болезни Альцгеймера с поздним началом зависят от образа жизни и от вредоносного воздействия факторов окружающей среды. Один из главных факторов — загрязнение воздуха.

Наибольшее беспокойство вызывают рассеянные в воздухе токсинсодержащие жидкие и твердые примеси размером около 1/30 толщины волоса. За свой размер они называются «мелкодисперсные частицы *PM 2,5*». Обычно они возникают при сжигании нефтяного и газового топлива в автомобилях, а также угля и древесины. Эти частицы при вдохе поступают глубоко в легкие и легко проникают в кровоток. Ученые показали, что когда *PM 2,5* попадают в организм, они разрушают дыхательную и кровеносную систему человека, вызывая рак, инфаркты, инсульты, и приводят к ранней смерти.

Раньше исследователи считали, что мозг защищен от такой атаки с помощью гематоэнцефалического барьера — системы клеток, плотно расположенных вокруг сосудов и препятствующих проникновению ядовитых веществ из крови в ткани мозга. К несчастью, сейчас есть доказательства, что *PM 2,5* могут проникать в мозг. Они попадают туда двумя способами: во-первых, сами эти частицы могут делать гематоэнцефалический барьер проницаемым для загрязнителей, во-вторых, они могут обойти барьер, попав через носовую полость и обонятельный нерв в часть мозга, которая называется «обонятельная луковица». Мозг, оказывается, защищен от безжалостной угрозы такого загрязнения не больше, чем любой другой орган.

Сильное воздействие

Большинство последних работ о связи плохого воздуха с заболеваниями мозга берут свое начало от раннего исследования терапевта и нейропатолога Лилиан Кальдерон-Гарсидуэньяс (Lilian Calderón-Garcidueñas) из Университета Монтаны. Кальдерон-Гарсидуэньяс, которая родилась и выросла в городке неподалеку от Мехико, на протяжении десятилетий изучала влияние загрязненного воздуха этого региона на здоровье. В начале 2000-х гг. она обследовала 40 собак из самых загрязненных районов Мехико и нашла у них в мозге патологические изменения, характерные для болезни Альцгеймера.

Это открытие побудило ее посмотреть на мозг людей, живших в аналогичных районах. Ее встревожило увиденное: она обнаружила белки, связанные с болезнью Альцгеймера, у младенцев и детей младшего возраста. В 2008 г. она писала, что «резкое увеличение загрязнения воздуха следует рассматривать как фактор риска» для развития болезни Альцгеймера, в частности для тех, кто генетически предрасположен к этому заболеванию.

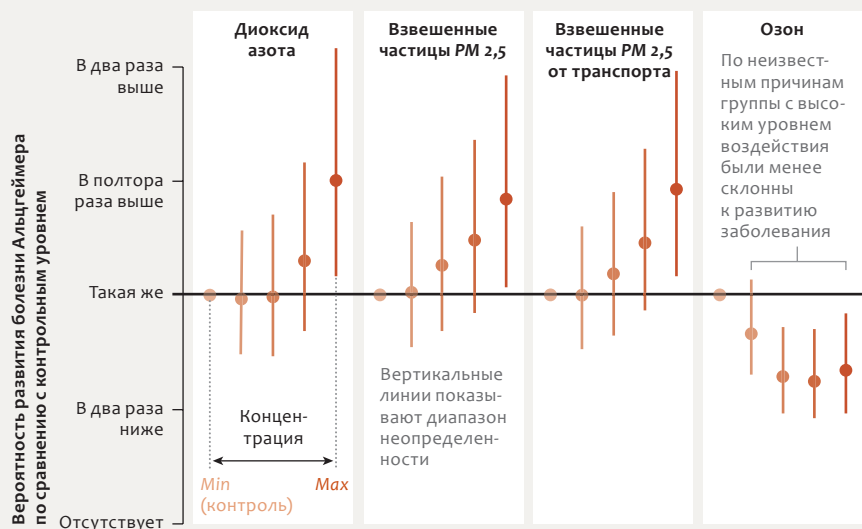
Выводы Кальдерон-Гарсидуэньяс были подтверждены и другими исследователями. Доцент Школы общественного здравоохранения Бостонского университета Дженнифер Уив (Jennifer Weuve) возглавила одно из первых в США исследований связи между

загрязнением воздуха и заболеваниями мозга и опубликовала свои результаты в 2012 г. Она рассказывает: «У нас были две идеи о влиянии загрязненного воздуха на мозг. Первая — это воздействие загрязнения на кровеносную систему: инфаркты и инсульты. Поскольку мозг зависит от кровообращения, естественно, он тоже пострадает. Вторая была менее очевидной. Токсикологи провели несколько исследований в хорошо контролируемых условиях, где животные дышали воздухом с высокой концентрацией взвешенных частиц, и обнаружили, что эти частицы попадают в мозг. Некоторые из таких частиц содержали известные нейротоксины, такие как марганец. И мы знали, что это могло быть вредно».

С тех пор накопилось еще больше эпидемиологических данных о проблеме частиц, взвешенных в воздухе. Журнал *BMJ* в 2018 г. опубликовал исследование, выполненное на 131 тыс. жителей Лондона в возрасте 50–79 лет, в котором было показано, что сильное воздействие загрязненного воздуха повышает вероятность выявления деменции в течение восьми лет, когда проводились эти наблюдения. Такая связь особенно четко прослеживается в отношении болезни Альцгеймера и частиц *PM 2,5*. Схожие результаты показало и исследование 100 тыс. жителей Тайваня. Шведские

Плохой воздух, поврежденный мозг

В период с 2005 г. до 2013 г. исследователи изучили около 131 тыс. жителей Большого Лондона в возрасте от 50 до 79 лет. Ни у кого из них на тот момент не была выявлена болезнь Альцгеймера. Ученые определили концентрации различных загрязнителей воздуха в тех районах, где жили эти люди, и разделили испытуемых на пять групп по степени воздействия. По сравнению с группой с самым низким уровнем веществ (контрольной) риск возникновения болезни Альцгеймера был повышен в двух группах с наиболее высоким уровнем диоксида азота и в трех группах с более высоким уровнем содержания токсичных частиц *PM 2,5* из выхлопных газов. Повышенный риск сохранялся даже при учете других факторов, таких как курение, возраст и пол.



SOURCE: «ARE NOISE AND AIR POLLUTION RELATED TO THE INCIDENCE OF DEMENTIA?»: A COHORT STUDY IN LONDON, ENGLAND, BY JANNIK SCHNEIDER ET AL., IN *BMJ OPEN*, SEPTEMBER 11, 2018; GRAPHICS BY Amanda Montañez.

исследователи пришли к выводу, что загрязнение воздуха увеличивает риск деменции даже у тех людей, у кого нет генетической предрасположенности к этому заболеванию. А ученые из Торонто, обследовав 6,6 млн людей из канадской провинции Онтарио, обнаружили, что риск появления деменции у тех, кто живет на расстоянии не более 50 м от крупных дорог, где содержание взвешенных частиц довольно большое, на 12% выше, чем у тех, кто живет на расстоянии более 200 м от тех же дорог.

Из воздуха в мозг

Естественно, у эпидемиологических работ есть свои ограничения. Неэтично просить людей подвергать себя воздействию загрязненного воздуха на протяжении месяцев или лет. Эти ограничения затрудняют проведение исследования в контролируемых условиях, где можно было бы исключить многие факторы кроме собственно загрязнения воздуха, которые могут влиять на развитие у жителей этих регионов болезни Альцгеймера и других форм деменции.

«В идеальном мире каждый носил бы прибор, измеряющий загрязнение воздуха, и мы могли бы получать эти сведения в реальном времени, — говорит Уив. — Но мир не идеален. Так что мы работаем со специалистами для создания модели. Однако этого недостаточно. В случае болезни Альцгеймера надо учитывать длительное постоянное воздействие, а у нас даже нет единого мирового регистра людей, у которых выявлено это заболевание, не говоря уж о ресурсах для наблюдения за людьми в течение многих лет до проявления болезни. Поэтому подтвердить причинно-следственную связь довольно трудно». И, кроме того, в некоторых регионах мира воздух настолько грязный, что люди умирают от заболеваний сердца задолго до того, как у них проявятся симптомы болезни Альцгеймера с поздним началом.

Для того чтобы лучше разобраться в причинах и следствиях, ученые использовали животные модели для поиска биологических механизмов связи между нарушениями когнитивной деятельности и загрязнениями воздуха разных типов и масштабов. В 2015 г. глава департамента биомедицинских наук в Школе медицины и медицинских наук Университета Северной Дакоты нейробиолог Колин Комбс (Colin Combs) вместе со специалистом по нейродегенеративным заболеваниям на разное время нагнетал в клетки к генетически идентичным мышам воздух с разным объемом примесей. Он убедился, что чем сильнее было воздействие, тем больше были повреждения. Комбс говорит: «Наши выводы подтверждают теорию, что долговременное воздействие взвешенных частиц может менять работу мозга и способствовать раннему развитию патологий вроде болезни Альцгеймера». В 2018 г. ученые из Медицинского центра Седарс-Синай

в Лос-Анджелесе сообщили, что тяжелые металлы из загрязненного воздуха не просто обнаруживаются в мозге крыс всего после нескольких месяцев воздействия, но, по-видимому, еще и активируют гены, запускающие развитие нейродегенеративных заболеваний и рака.

Загрязнение воздуха может напрямую воздействовать на определенные аллели, запуская ускоренное старение мозга или процессы нейродегенерации у людей, имеющих генетическую предрасположенность. Такое взаимодействие генов и окружающей среды представляется очень важным, поскольку эти аллели есть у многих людей с болезнью Альцгеймера. Клинический психолог Маргарет Гац (Margaret Gatz) из Южно-Калифорнийского университета поясняет: «Есть множество доказательств, что факторы, повышающие риск развития сосудистых болезней, более опасны для носителей аллели *APOE4* гена *APOE*. По этой и ряду других причин большинство исследований были сосредоточены на генетическом риске и почти не учитывали образ жизни и условия окружающей среды».

Действие токсичных веществ из загрязненного воздуха хорошо согласуется с некоторыми представлениями о том, как развиваются повреждения, подобные болезни Альцгеймера. Нейротоксиколог из Медицинского центра Рочестерского университета Дебора Кори-Слехта (Deborah Cory-Slechta) заявила, что и у животных, и у людей эти загрязнители вызывают выброс цитокинов из клеток микроглии, отвечающих за иммунную защиту в мозге. Цитокины — это сигнальные молекулы, помогающие регулировать иммунную реакцию и воспалительный процесс. В нормальных условиях данный процесс помогает защитить мозг от чужеродных захватчиков. Однако постоянное воздействие загрязняющих частиц может приводить к чрезмерному выделению провоспалительных цитокинов и хроническому воспалению, что приводит в свою очередь к гибели нервных клеток.

Исследовательница отмечает также, что трудно выделить влияние отдельных компонентов этих частиц. «Во-первых, у нас накоплено слишком мало данных за прошедшие годы, чтобы определить, каков был их уровень в окружающей среде. Во-вторых, все они содержат разные вещества, которые мы рассматриваем вместе». Из-за этого очень сложно выяснить, что именно вызывает такой негативный эффект.

Загрязняющие частицы образуются от сжигания ископаемого топлива и из других источников и содержат сотни субстанций начиная от таких вредных газов, как диоксид серы и оксид азота, и заканчивая пылью от автомобильных тормозов, двигателей и шин. Кори-Слехта говорит, что эти загрязнители накапливаются в мозге на протяжении многих лет. Этим можно объяснить, почему

болезнь Альцгеймера обычно начинается в позднем возрасте. В то же время, добавляет она, многое остается неизвестным. Например, неясно, что эти вещества делают внутри и когда они начинают создавать неприятности. «Мы точно знаем, что железо, цинк, медь и другие металлы необходимы мозгу, но в определенном количестве. А что происходит, когда этот уровень превышен? — спрашивает Кори-Слехта. — Мы знаем, что избыток железа приводит к окислительному стрессу и нейродегенерации. Нам известно также, что такие загрязнители, как алюминий, не играют важной роли в мозге, но им свойственно накапливаться и вызывать воспалительную реакцию. Откровенно говоря, мне кажется, что нам следует внимательней изучить это. И не только металлы. Органические загрязнители тоже могут быть вовлечены в развитие нейродегенеративных заболеваний».

Среди таких органических загрязнителей — липополисахариды, крупные молекулы, которые выделяются бактериями из очистных сооружений и других источников. Ученые обнаружили, что эти молекулы могут прикрепляться к частицам и, если их вдохнуть, вызывать воспалительную реакцию в легких. В исследованиях на животных было показано, что липополисахариды и другие органические вещества могут вызывать воспаление в мозге и связанные с ним когнитивные нарушения.

Частицы и потеря памяти

Врач-эпидемиолог Цзю-Цзюань Чэнь (Jiu-Chiuan Chen) из Южно-Калифорнийского университета, который изучает влияние загрязняющих веществ из воздуха на мозг, говорит, что хотя действие каждого отдельно вещества еще обсуждается, тот факт, что их смесь приводит к когнитивным нарушениям и повреждениям мозга, не вызывает сомнений. Чэнь — соавтор статьи, которую опубликовали в журнале *Brain* в прошлом году. В этой работе показана четкая связь между загрязнением мелкодисперсными частицами, структурными изменениями в мозге и потерей памяти у пожилых женщин. Чэнь с коллегами использовал нейровизуализацию и когнитивные тесты, а также математическую модель, учитывающую два источника данных о качестве окружающего воздуха.

Он говорит: «Мы обнаружили, что у женщин, которые сильнее всех подвергались воздействию загрязнителей, наблюдалось наибольшее снижение эпизодической памяти». Такой тип памяти включает в себя воспоминания о произошедших эпизодах жизни, их месте и времени, а также о сопутствующих эмоциях. Отклонения, которые выявил Чэнь, были доклиническими, то есть проявлялись до основных симптомов болезни Альцгеймера, и не зависели от состояния сердечно-сосудистой системы. Исследования болезни Альцгеймера свидетельствуют, что у людей с отклонениями

в эпизодической памяти очень высок риск последующего развития полномасштабного заболевания.

Чэнь рассказывает: «Существует не менее десятка исследований, где была показана связь между воздействием загрязненного воздуха на людей пожилого возраста и деменцией. Этому есть весьма убедительные доказательства. Мы пока не знаем, может ли быть такое воздействие в детстве тоже фактором риска. Однако есть исследования на животных, в которых токсикологи наблюдали патологические изменения после воздействия и в раннем возрасте. По-видимому, мелкие частицы могут ускорять процесс накопления амилоидного белка, но мы не до конца уверены, так ли это у человека. Возможно, здесь задействован и генетический компонент: некоторые люди могут быть более чувствительными к загрязнению, чем другие. Наши исследования пока не могут дать ответы на подобные вопросы, но я верю, что мы это выясним».

Снижение риска

В то время как по всему земному шару миллионы людей сталкиваются с этим ужасным заболеванием, открытия ученых о роли загрязнения воздуха обнадеживают: люди могут уменьшить опасность. Эпидемиолог Мелинда Пауэр (Melinda Power) из Университета Джорджа Вашингтона, занимающаяся выявлением факторов, снижающих риск когнитивных отклонений и деменций, считает, что пока большинство препаратов не помогают пациентам. Она говорит: «На данный момент лучшее, что мы можем делать, — это профилактика, то есть снижение воздействия значимых факторов окружающей среды и образа жизни. И среди них загрязнение воздуха выглядит очень важным».

По мнению эпидемиолога Мичиганского университета Келли Бакульски (Kelly Bakulski), данные о повреждении мозга — это сильный аргумент в пользу более жесткого контроля качества воздуха. Она говорит: «Это очень обнадеживающая область. В отличие от наших генов факторы окружающей среды мы можем контролировать. Избавление от загрязнителей будет иметь только положительные последствия».

Кроме того, Гац считает, что могут оказаться полезными даже простые изменения нашего образа жизни. Она говорит: «Показано, что физические упражнения снижают риск», потому что они усиливают кровоток в мозге и увеличивают уровень нейротрофического фактора мозга (*BDNF*) — белка, который способствует росту нейронов и обеспечивает их работу.

Пришло время серьезно отнестись к таким изменениям. Бакульски говорит: «Мы можем это сделать — и мы должны, понимая, как опасно бездействие».

Перевод: М.С. Багоцкая

«ГЛАВНЫЕ ВРАГИ COVID-19 — ВОДА, МЫЛО И ЗДРАВЫЙ СМЫСЛ»



Член-корреспондент РАН
С.Т. Мацкеплишвили

О медицинском центре МГУ им. М.В. Ломоносова, который во время эпидемии COVID-19 был временно перепрофилирован в инфекционный госпиталь, теперь ходят легенды: общая смертность не превысила одного процента. И это при том, что в клинику госпитализировались в основном тяжелые пациенты. Как удалось добиться таких результатов? Этот вопрос мы задали члену-корреспонденту РАН Симону Теймуразовичу Мацкеплишвили, доктору медицинских наук, профессору, заместителю директора по научной работе Медицинского научно-образовательного центра МГУ им. М.В. Ломоносова.

— Симон Теймуразович, было очень много информации о том, что именно в клинике МГУ нашли оптимальный способ выхаживать пациентов с новой коронавирусной инфекцией. Есть ли тут какой-то секрет и можете ли вы нам его раскрыть?

— В качестве ковидного госпиталя мы проработали чуть больше семи недель, если быть точным — 55 дней. Первые пациенты к нам поступили 21 апреля, а последние выписались 14 июня, за это время были пролечены 424 человека. Вы употребили очень правильное слово: мы их именно выхаживали. Достигнутые нами показатели сложно рассматривать как эталон или пример для тиражирования, поскольку в условиях значительно большего количества пациентов результаты, возможно, были бы другими.

А секрета тут никакого нет. Во-первых, мы приняли решение: одна палата — один пациент. Поэтому у нас было всего 100 мест в линейных отделениях и еще 24 — в отделении реанимации и интенсивной терапии. При этом постарались максимально задействовать весь медперсонал, поэтому соотношение количества врачей и пациентов было высоким. Неоценимую поддержку оказал факультет фундаментальной медицины МГУ — сотрудники, студенты, ординаторы, аспиранты, с которыми мы стали единой командой и трудились вместе, выхаживая пациентов.

Второй, тоже очень важный, фактор успеха заключается в том, что с самого начала мы критически пересмотрели практически все российские и международные рекомендации по лечению

пациентов с новой коронавирусной инфекцией и разработали собственный протокол медицинского центра МГУ. В ходе нашей деятельности он неоднократно модернизировался, пока не достиг того идеала, который мы и использовали в нашей клинике. Это, наверное, стало наиболее существенным вкладом в полученные результаты лечения COVID-19, которые действительно очень многих удивили и продолжают удивлять до сих пор.

Следующим важным фактором стали консультации ведущих специалистов нашего медицинского центра, которые проводились каждый день, вне зависимости от того, рабочий он, выходной или праздничный. Мы обсуждали и принимали индивидуальные решения по тактике обследования и лечения наиболее тяжелых пациентов в линейных отделениях, а также всех больных, находящихся в отделении реанимации и интенсивной терапии, стараясь выбрать тот единственный путь, пройдя который, больной полностью выздоравливает.

— Чья это была инициатива?

— Нашего директора, академика А.А. Камалова, и эта инициатива во многом предопределила наш успех. Кроме того, в самом начале функционирования нашей клиники в качестве ковидного госпиталя было принято важное решение о максимальном делегировании полномочий руководителям линейных клинических отделений. Как я говорил, их у нас было четыре, и каждый заведующий на это время фактически стал директором своего обособленного подразделения. Более того, при восьмичасовом поменном режиме работы руководители отделений каждый день лично обеспечивали преемственность лечения больных, координируя передачу информации от уходящей смены к заступающей на дежурство. Такой непрерывный контроль целостности лечебного процесса оказался крайне полезен.

Были и другие важные факторы. Это, безусловно, наша радиологическая служба, уникальная в отношении как диагностических систем, так и замечательных специалистов, которые в круглосуточном режиме предоставляли нам всеобъемлющую информацию о состоянии пациентов. При этом мы использовали программное обеспечение, разработанное в МГУ, позволяющее с высокой точностью рассчитать характер и степень поражения легочной ткани.

И, конечно, очень помогала наша клиническая лаборатория. Мои американские друзья до сих пор не верят, что результаты

анализа крови на интерлейкин-6 мы получили менее чем за час, а генетического исследования на наследственную тромбофилию — на следующий день. У них это порой занимало дни и недели. А ведь это очень важно, особенно в нынешних условиях, когда врачам было сложно проводить привычное обследование пациентов. Будучи облаченным в средства индивидуальной защиты, в двух парах перчаток и массивных очках проводить физикальное обследование, даже просто выслушивать легкие, невозможно.

— Сколько человек вам не удалось спасти?

— Из 424 человек, к сожалению, нам не удалось сохранить жизни четверых пациентов.

— Это менее одного процента, в то время как в других стационарах показатель смертности составляет 12–15%. Невероятно.

— Не хотел бы сравнивать нас с другими медицинскими учреждениями. Я знаю, что все выкладывались по максимуму. Но вот эти особенности, о которых я сказал, сыграли важную роль. Университетская клиника — это не обычный госпиталь, помимо лечебной работы она выполняет другие важные задачи — ведет исследования и учит студентов, ординаторов и дипломированных специалистов. По сути, во всем мире университетские клиники — это ориентир, маяк, позволяющий здравоохранению двигаться в верном направлении даже в шторм.

— Знаю, что смертность на ИВЛ, которая в других учреждениях превышала 80%, у вас составила меньше 15%. Как это возможно?

— Наше отделение реанимации и интенсивной терапии совершило настоящее чудо. Например, были пациенты, которые находились на искусственной вентиляции легких по несколько недель и при этом, как я сказал, они получали глюкокортикоидные гормоны, значительно увеличивающие вероятность вторичных бактериальных инфекций. Но у нас не было практически ни одного случая так называемой вентилятор-ассоциированной пневмонии даже у пациентов с тяжелым поражением легких, полиорганной недостаточностью, серьезными сопутствующими заболеваниями.

— Чудо — это, конечно, хорошо, но можно ли дать всему этому феномену научное объяснение?

— Конечно. Главное — мы сумели избежать нескольких принципиальных ошибок,

допущенных во всем мире при лечении COVID-19. Одна из них заключалась в том, что делался упор на искусственную вентиляцию легких и мощные антицитокиновые препараты. Подготовленность клиник к лечению больных оценивалась по количеству имеющихся аппаратов ИВЛ, при этом почти не проводилось лечение пациентов в более или менее стабильном состоянии с целью предотвращения той степени дыхательной недостаточности, когда им потребуется искусственная вентиляция легких.

Мы пошли совершенно другим путем — активно лечили пациентов в линейных отделениях, чтобы не допустить развития выраженной дыхательной недостаточности. Именно поэтому у нас в клинике было относительно небольшое количество больных, которым потребовалась искусственная вентиляция легких. Если же она все-таки требовалась, мы старались максимально отсрочить интубацию трахеи и перевод больного на инвазивную искусственную вентиляцию легких, с которой часто связывают высокие показатели смертности.

Надо сказать, что дыхательная недостаточность, особенно в контексте острого респираторного дистресс-синдрома, — это очень тяжелое состояние со средней летальностью во всем мире от 20 до 30–35%. Поэтому первые сообщения о небывало высокой смертности, которые поступали из Китая, Италии, США, честно говоря, меня удивляли.

Сейчас, оглядываясь назад, я думаю, что это было связано вовсе не с особой тяжестью состояния этих пациентов и не с тем, что ИВЛ, как до сих пор считают многие, —

опасная и жизнеугрожающая процедура, а скорее с тем, что, имея огромный наплыв действительно тяжелых пациентов, реаниматологи просто не справлялись с обеспечением оптимальных параметров вентиляции.

Искусственная вентиляция легких — это очень сложная, высокотехнологичная процедура, требующая помимо аппарата ИВЛ еще и специалиста, который управляет этим аппаратом. Это очень важно — вовремя менять режимы, постоянно адаптируя их к клинической ситуации. Мне кажется, что мы и в этом плане смогли достичь нужного баланса. А кроме этого каждый пациент, особенно длительно находящийся на ИВЛ, получал необходимый уход — это и санация трахеобронхиального дерева, и антибактериальная терапия, и постоянные изменения настройки аппарата ИВЛ, и многокомпонентная вспомогательная терапия.

— Так вы не считаете, что ИВЛ убивает пациентов?

— Конечно же нет. Искусственная вентиляция легких — это метод спасения, а никак не убийства. Еще древние врачи говорили, что одно и то же средство может быть и лекарством, и ядом в зависимости от того, как его применять. ИВЛ — это процедура, которая спасает жизнь. Более того, практически у всех пациентов, которым выполняют серьезные хирургические вмешательства, искусственная вентиляция легких — часть анестезиологического пособия. Они же не умирают.

Другое дело, когда имеется тяжелое поражение легких и развивается уже ставший притчей во языцех цитокиновый шторм.



У нас был пациент, довольно известный священник Русской православной церкви. Поступил он с очень тяжелым течением COVID-19, была выраженная воспалительная реакция, массивные зоны «матового стекла» при компьютерной томографии. Мы начали его активно лечить, в том числе гормонами. А эти препараты очень сильно активируют свертывающую систему крови. У пациента развились тромбоз вен нижних конечностей и тромбоз эмболия легочной артерии.

На фоне нештучной тревоги со стороны священнослужителей мне звонит мой очень близкий друг — один из ведущих кардиологов мира, живущий и работающий в Мадриде, — и говорит, что представитель испанской католической церкви, зная, что этот пациент находится у нас в клинике, просят его воздействовать на ситуацию.

Пациент перенес множество осложнений, провел долгое время в отделении реанимации и интенсивной терапии, долго и трудно восстанавливался, у него была выраженная слабость, на фоне приема определенных антибиотиков развились поражения связочного аппарата. И в какой-то момент он попросил пустить к нему его коллег священников, чтобы он мог причаститься.

Мы пошли навстречу, понимая, как ему это важно. Все, разумеется, были в защитных костюмах. Он причастился в своей палате и совершенно преобразился. И через две недели мы отпустили его домой в полном здравии. Вообще, психологическая поддержка крайне важна, наши сотрудники помнили о том, что, врачуя тело, нельзя забывать о душе.

Тогда результаты лечения ухудшаются, но совсем не по причине использования ИВЛ, а потому что это состояние само по себе имеет крайне серьезный прогноз. Ведь искусственная вентиляция легких неспособна устранить системное воспаление или цитокиновый шторм, она лишь на время заменяет функцию легких, как мы говорим, протезирует их функцию, давая организму время и силы справиться с болезнью.

— Симон Теймуразович, вы говорите, что достаточно быстро смогли подобрать схемы лечения, отличные от тех, которые рекомендовали ВОЗ или Минздрав. Как вам это удалось?

— Я уже упоминал некоторые серьезные ошибки, которые, как мне кажется, были допущены повсеместно. Еще одна из главных ошибок заключалась в том, что основной акцент в лечении новой коронавирусной инфекции делался на борьбу с вирусом. При этом мы все прекрасно понимаем, что до сих пор никакой доказанной противовирусной терапии в отношении коронавируса SARS-CoV-2 не существует. Это привело к ложному впечатлению, что раз мы не можем уничтожить вирус, то мы не можем вылечить пациента. А многие так думают и до сих пор, заиклившись на поисках способов борьбы с вирусом. С этой целью перепробованы практически все препараты, которые когда-либо использовались для лечения заболеваний, вызываемых РНК-вирусами. Это и лекарства, которые мы используем для лечения инфекций, вызванных вирусом иммунодефицита человека, практически сразу показавшие полное отсутствие какой-либо эффективности. При этом они имеют большое количество побочных эффектов и межлекарственных взаимодействий, которые затрудняют применение многих других видов терапии. Это и препараты против вируса гриппа, в частности ингибиторы нейраминидазы, которые использовались и используются до их пор, также при полном отсутствии эффекта в отношении коронавируса SARS-CoV-2. Непонятно, зачем?

— Видимо, многие думали, что раз такие препараты действуют на РНК-вирусы, то они могут сработать и в этом случае.

— Действительно, SARS-CoV-2 — тоже РНК-вирус, но он совсем не похож на другие вирусы. То, что все они относятся к РНК-содержащим вирусам, еще ничего не значит. Даже РНК-зависимая РНК-полимераза, на блокирование которой направлен один из активно изучаемых

У нас лечилась пациентка 96 лет, ветеран Великой отечественной войны, труженица тыла с множеством наград. Звали ее Настасья Филипповна, как героиню знаменитого романа Достоевского. Она поступила в тяжелом состоянии, но ближе к выписке уже всем «давала прикурить» и даже пыталась наводить порядок и принимать собственные дисциплинарные меры. Чрезвычайно жизнелюбивый, несгибаемый человек с мощной волей к жизни. Мы знали, что возраст — это один из главных рисков, и были счастливы, что смогли ей помочь.

Интересно, что при выписке пациенты видят своих врачей впервые: ведь раньше, во время болезни, они были в защитных костюмах. Так вот, наша Настасья Филипповна поразила всех своей живой памятью и наблюдательностью. Она всех врачей узнавала по глазам. Было забавно и трогательно наблюдать, как она по-детски наивно всплескивает руками, узнавая тех, кто выхаживал ее все это время.



сейчас препаратов, у каждого вида вируса разная и зависит от его генотипа. Поэтому мне сложно представить, что препарат, который препятствует, например, репликации вируса Эбола, будет эффективным при коронавирусной инфекции, вызванной вирусом с совершенно иной структурой рибонуклеиновой кислоты.

— То есть вы решили не применять противовирусные препараты?

— Да, мы отказались от них почти сразу. Почему? Во-первых, если вспомнить другие вирусные инфекции, гораздо более тяжелые и опасные, чем коронавирусная: корь, вирусный энцефалит, полиомиелит, — то мы ведь не лечим их противовирусными препаратами. Мы лечим само заболевание. Зачем же «гоняться с молотком» за этим вирусом? Мы решили: да, причина заболевания — вирус, но мы будем лечить людей. Этому тезису сотни лет, формулировали его и Авиценна, и Гиппократ, и знаменитый выпускник Московского университета М.Я. Мудров, и звучит он так: «Надо лечить не болезнь, а больного». Поэтому у нас практически не было пациентов, которым назначали противовирусную терапию, за исключением тех, кто был включен в клиническое исследование по фавипираву.

Во-вторых, мы сразу поняли, что COVID-19 — это не болезнь органов дыхания, а системное заболевание.

— Иначе говоря, то, что COVID-19 долгое время считался проблемой исключительно дыхательной системы, тоже было ошибкой?

— Да, это так. Нам довольно быстро стало понятно, что это системное заболевание,

У нас была одна пациентка — наша коллега, заслуженный известный врач. Клинически она была довольно тяжелой, но при этом не имела выраженных изменений при компьютерной томографии. Это тоже важный урок: мы поняли, что результаты КТ не всегда соответствуют тяжести заболеваний.

У нас было подспудное ощущение, что здесь что-то не так. И буквально за день-другой у нее развилось серьезнейшее поражение легких: по данным КТ, нормальной легочной ткани почти не осталось. Значительно нарушился газообмен, присоединилась тяжелейшая дыхательная недостаточность.

Пациентка была переведена в отделение реанимации и интенсивной терапии. Естественно, это потребовало искусственной вентиляции легких, на которой она провела несколько недель. Состояние было крайне тяжелое, надежды на выздоровление почти не оставалось. У нас было несколько больных в критическом состоянии (она, наверное, одна из самых

показательных), когда, кроме титанических усилий медперсонала, присутствовало какое-то чудо.

Наша пациентка пережила этот период и начала восстанавливаться. Очаги в легких начали потихоньку рассасываться, потом пришло сознание, она стала самостоятельно дышать. Без вторичных бактериальных осложнений перенесла всю нашу терапию, включая недели ИВЛ.

Мы сделали вывод: клиническая картина важнее результатов КТ. И это позволило в прямом смысле слова спасти несколько десятков последующих больных. Описанный случай очень показателен еще и потому, что показывает нам, как важна врачебная интуиция. Мы можем не видеть признаков тяжелого течения болезни, но если мы чувствуем, что здесь что-то не так, то обязаны это учесть. Это «шестое чувство» в нашей профессии очень важно и не может быть заменено никакими роботами и «умными» технологиями.



не локализующееся только в легких. Мы знаем довольно много об атипичной пневмонии 2002–2003 гг., которая тоже вызывалась коронавирусом SARS-CoV-1. Это очень близкий родственник современного коронавируса. Уже установлено, через какие рецепторы эти вирусы попадают в клетки органов-мишеней. Соответственно, раз эти рецепторы расположены на клетках легочного эпителия — альвеолоцитах второго типа, то будут поражаться легкие. Рецептором же выступает белок, который называется «ангиотензин-превращающий фермент 2». Нам, кардиологам, он хорошо знаком и привычен. Он расположен практически на всех клетках сердечно-сосудистой системы. Поэтому вирус имеет способность повреждать как кровеносные сосуды, так и напрямую сердечную мышцу. Примерно 15–20% (по некоторым данным, 25%) пациентов с COVID-19 переносят острый миокардит — крайне тяжелое осложнение системной вирусной инфекции. Третий орган-мишень — это почки. Почечная недостаточность также представляет собой очень серьезное осложнение, иногда дело доходит до необходимости применения заместительной почечной терапии — гемодиализа. У нас такие пациенты тоже были. В наиболее тяжелых случаях функция почек утрачивается безвозвратно, поэтому им требуется хроническая заместительная почечная терапия.

Таким образом, оказалось, что COVID-19 — это не болезнь дыхательной системы, а скорее болезнь кровообращения: сердечно-

сосудистой системы и системы свертывания крови. Исходя из всего этого, мы поняли, что должны лечить острое системное воспалительное заболевание, сопровождающееся поражением кровеносных сосудов и васкулитом. А васкулит — это всегда тромбоз и нарушение перфузии органов. Значит, нужна противовоспалительная и антикоагулянтная терапия. Мы получили эти данные не в результате клинических исследований, а просто проанализировали то, что было известно уже давно.

— Вы сказали о применении нестероидной противовоспалительной терапии. А ведь многие специалисты до сих пор считают, что ибупрофен может приводить к гибели таких пациентов.

— И это еще одна ошибка. Скорее какая-то нелепость, на мой взгляд. Началось все с Франции, а потом ВОЗ тоже это подхватила, заявив, что пациенты должны получать парацетамол и не получать нестероидные противовоспалительные препараты, в первую очередь ибупрофен. Мы и это положение с самого начала поставили под сомнение. Нашей целью была борьба с системным воспалением, где этим препаратам отводится важная роль. А потом мы решили пойти еще дальше и практически сразу стали использовать еще более сильные противовоспалительные средства — глюкокортикостероиды, или стероидные гормоны, как мы их еще называем. Тут у нас несколько основных препаратов — преднизолон, метилпреднизолон и дексаметазон, которые

подавляют системное воспаление и способны предотвращать развитие цитокинового шторма. Мы не изобретали ничего нового, не придумали новое лекарство или технологию. Мы просто решили рационально подойти к вопросу борьбы с воспалением и вместо неэффективной этиотропной, то есть противовирусной, терапии использовали патогенетическую терапию, направленную на восстановление нарушенных в результате болезни физиологических процессов и механизмов.

— Очень много было использовано антибиотиков во время этой эпидемии. Всегда ли оправданно?

— С антибиотиками отдельная история. Действительно, было море антибиотиков, и проблема бактериальной резистентности, уже сегодня довольно непростая, значительно усилится через несколько лет. Поэтому мы старались, насколько было возможно, ограничивать применение антибиотиков и не использовать их без четких указаний на наличие бактериальной инфекции.

— Знаю, вы еще использовали препарат колхицин, о котором тоже много разговоров.

— Да, сейчас его используют почти во всем мире. Мы давно его применяем у пациентов с острыми приступами подагры, для лечения острых перикардитов. А в прошлом году на конгрессе Американской кардиологической ассоциации были представлены совершенно удивительные данные о том, что колхицин за счет противовоспалительного эффекта может снижать смертность и вероятность повторного инфаркта миокарда у пациентов с ишемической болезнью сердца. Это серьезный противовоспалительный препарат. И мы подумали: почему бы нам не использовать колхицин в качестве противовоспалительной терапии для стабильных пациентов с COVID-19, чтобы они не стали нестабильными? Вопрос же не в том, как лечить тяжелых пациентов, а прежде всего в том, как лечить 80% заболевших людей, чтобы они не перешли в те 20%, которым требуется серьезная, дорогая, очень тяжело переносимая и не везде доступная терапия. И вот мы сконцентрировались на этих 80% больных, включая амбулаторных пациентов.

— Скажите, не было ли у вас неприятностей из-за того, что вы ввели самостоятельные схемы лечения и не стали следовать рекомендациям Минздрава или ВОЗ?

— Рекомендации Минздрава — это же не приказ. Это очень важный, хороший документ, но какие у меня к нему претензии? Во-первых, он слишком объемный. Руководителю инфекционного отделения довольно непросто внимательно изучить этот большой, сложный документ, чтобы разобраться в том, как лечить пациентов. А наш протокол занимает всего две страницы. Это предельно конкретный алгоритм, из которого ясно, как лечить того или иного больного. И он даже в первых своих версиях включал противовоспалительную и антикоагулянтную терапию у всех пациентов.

Открою еще один секрет. Почему мы почти сразу обратились к гормонам? Да просто потому, что у нас в какой-то момент не было никаких других подходящих препаратов. Хотя мы и университетская клиника МГУ, но испытывали определенные трудности с лекарственным обеспечением, поскольку тот же тоцилизумаб, про который все говорили, у нас отсутствовал.

— Это ситуация, про которую говорят: голь на выдумки хитра.

— Именно так. Поначалу мы, как и все, очень боялись, не знали, что будет. Когда к нам начали поступать больные, некоторые думали, что вот он, конец света. Каждого пациента на первых консилиумах обсуждали по полчаса, волновались, спорили. А на последних консилиумах мы уже смеялись, шутили над самими собой в начале этого пути, радовались тому, что разгадали секрет лечения болезни, вызываемой этим вирусом. Оказалось, что вирус не коварный, не секретный, не ужасный. Просто надо понять, как он действует, и, соответственно, помешать ему.



У нас был пациент, которому в конце прошлого года по поводу тяжелой сердечной недостаточности имплантировали специальный прибор: кардиовертер-дефибрилятор — маленькое устройство, которое устраняет жизнеугрожающие аритмии.

В начале этого года он заболел COVID-19. Ему, как обычно, назначили амбулаторно гидроксихлорохин и азитромицин. Он исправно принимал эти препараты, пока за один день у него не произошли три эпизода фибрилляции желудочков, проща говоря, остановки сердца, которые купировались разрядами этого прибора.

Это пример того, как бездумное следование рекомендациям может привести к самым тяжелым последствиям вплоть до смерти пациента. Его доставили к нам, состояние, естественно, было очень тяжелым, но нам удалось его стабилизировать, и сегодня он уже дома, чувствует себя хорошо.

— И в чем же секрет этого вируса?

— В том, что он для нас новый, и в том, что мы не знали, какие изменения в организме он вызывает.

— Симон Теймуразович, как чувствуют себя ваши сотрудники?

— У нас 18 человек заболели, включая заместителя директора по лечебной работе и заведующего отделением реанимации. Некоторым даже понадобилась госпитализация. Мы никого не потеряли, и, к счастью, уже можно сказать, что все самое страшное позади. Но тема все равно очень болезненная, потому что погибло большое количество моих коллег. В том числе мой близкий друг, профессор Маурицио Гальдеризи из Неаполитанского университета им. Фридриха II, который имел все права оставаться дома по возрасту, но принял решение лечить пациентов и, к сожалению, сам не справился с болезнью. Великий кардиолог, большой ученый и великолепный учитель. В Италии вообще умерло очень много врачей, причем первый удар на себя приняли именно мои коллеги кардиологи. Дело в том, что первые случаи заболевания сопровождались непонятными ощущениями в груди, одышкой, у части пациентов повышением кардиоспецифических маркеров крови, что побуждало врачей скорой помощи заподозрить острое нарушение коронарного кровообращения, то есть, говоря простым языком, острый инфаркт миокарда. Этих пациентов доставляли в отделения неотложной кардиологии, где еще никто не знал, что это начинающаяся эпидемия коронавирусной инфекции. Поэтому врачи



Основной залог успеха в выхаживании тяжелого пациента — это уход. В пять, в шесть утра многие пациенты жаловались: «Отстаньте от нас, дайте нам поспать». Наверное, их утомлял непрерывный, ежеминутный, если не ежесекундный, контроль их состояния, когда к ним постоянно входили медсестры, студентки, санитарки, заведующие отделением, чтобы следить, лежат ли они на животе, проверять различные показатели. Но мы их в покое не оставляли, поэтому большинство из них и выжили.

У нас был пациент, который поступил с весом 150 кг, выпался — где-то 112–113 кг, проведя несколько недель в реанимации на аппарате искусственной вентиляции легких. После перевода в палату он буквально не мог есть — не было сил поднять ложку. И наши врачи, ординаторы кормили его с ложки, помогли встать на ноги. И таких пациентов было немало.

никак не защищались. Мы в нашей стране тоже потеряли большое количество медицинских работников, не только врачей. Это, конечно, очень больно.

Сейчас повсюду висят фотографии врачей со словами «Спасибо, доктор!» Их печатают в прессе, показывают по телевизору. Врачи внезапно стали героями, их благодарят, вручают награды. Но врачи не стали героями, они всегда ими были, просто этого никто не замечал. Есть надежда, что нынешнее испытание вернет медикам надлежащий социальный статус.

— На сайте Медицинского центра МГУ выложены ваши схемы лечения для среднетяжелых, тяжелых и для легких амбулаторных пациентов. Ни одно другое лечебное учреждение такого не сделало. А для чего это сделали вы?

— Ох, сколько мы наслушались на эту тему... Спектр реакций был довольно широкий — от удивления до осуждения. Почти все ведущие университеты США и Европы разработали и опубликовали свои протоколы, чтобы всем было понятно, как там лечат. Мы тоже показали, к чему пришли в результате нашей деятельности. Это важно! Мы продемонстрировали инструмент, с помощью которого добились действительно прекрасных результатов. Многие доктора использовали и используют этот протокол, и не только в нашей стране, потому что он работает. В нем можно найти принципы лечения больных, о которых в официальных рекомендациях мало что сказано, в первую очередь амбулаторных пациентов и, что наиболее важно, выписываемых после лечения. В стационаре они получают высокие дозы антикоагулянтов, а в какой-то момент эту терапию прекращают и их отпускают домой. У них могут быть серьезные проблемы со свертывающей системой крови. Мы же всех наших пациентов сопровождали довольно длительной антикоагулянтной терапией. И в нашем протоколе эти схемы тоже прописаны.

— А за что же вас осуждали?

— Скорее не понимали, как мы решились на разработку собственного протокола, когда есть официально утвержденный. Наверное, не всем очевидно, что окончательное решение всегда принимает лечащий врач. Ну и, конечно, проще рассуждать так: «Вот есть рекомендации, там все написано, так и буду лечить», чем немножко поразмыслить и понять суть заболевания. Мне в переписке грозили чуть ли не судебным разбирательством.

А еще было удивительно, что не все верили нашим результатам. Нас обвиняли в том, что мы отбираем более легких пациентов, проводим ИВЛ без показаний или, наоборот, что у них в отличие от нас слишком тяжелые пациенты, чтобы иметь хороший результат. Была масса каких-то нелепых или даже оскорбительных обвинений, которые я не хочу повторять.

На самом деле мы получали пациентов ровно таким же способом, как и другие учреждения в Москве, — по скорой помощи, причем не только из близлежащих районов, а со всего города. Более того, схема маршрутизации Департамента здравоохранения предполагала госпитализацию в федеральные учреждения только тяжелых пациентов. Так что никакой селекции у нас не было.

— Как вы думаете, какие самые важные уроки из этой истории мы должны извлечь?

— У этой пандемии будет очень много последствий — медицинских, демографических, социальных, экономических, психологических. Страх, который нагнетался и до сих пор продолжает нагнетаться, привел к панике и дестабилизации психического состояния многих людей, включая врачей. Поэтому главный урок, который надо извлечь, — не сходить с ума. Великий врач, один из основоположников современной медицины, сэр Уильям Ослер, основавший учение об инфекционном эндокардите, произнес чудесную фразу: «Лучшие дезинфицирующие средства — это вода, мыло и здравый смысл». Она очень подходит к нынешней ситуации. Так что нельзя терять здравый смысл.

— Но ведь и забывать о смертельной опасности болезни тоже нельзя.

— Конечно! Но паника во многом усугубляла течение заболевания. Есть такое выражение: «Страх не останавливает смерть, страх останавливает жизнь». Вот в этом смысле жизнь многих людей была парализована страхом, причем непонятно чего.

Второй урок: человек при всем кажущемся могуществе оказался совершенно беззащитен перед крошечным, невидимым даже в обычный микроскоп вирусом. А ведь это не последняя пандемия. Пандемии были, есть и будут. Поэтому мы должны продолжать исследования, и только наука — настоящий двигатель прогресса. И только она — это самое главное — спасет человечество.

Наука — это возможность находить правильные ответы на правильные вопросы.

Давайте вспомним, какие вопросы задавались и задаются во время нынешней пандемии. Искусственный ли вирус? Нужно ли носить маски? Будет ли вакцина? Можно ли заразиться повторно? И т.д. Но крайне редко звучал главный вопрос: как лечить заболевших людей? А ведь это один из главных вопросов. Именно его мы сами себе и задали. И нашли ответ.

— Во время эпидемии мы столкнулись с отказом в плановой помощи многим, в том числе кардиологическим пациентам. Как думаете, это принесет свои горькие плоды?

— Это важный вопрос. Действительно, в Москве практически все больницы были перепрофилированы под COVID-19, и плановые стентирования, абляции и другие процедуры выполнялись в крайне небольшом количестве, потому что не позволяла эпидемиологическая обстановка.

И что мы видим? Ничего катастрофического пока не произошло. Мы, кардиологи, знаем довольно давно: почти все выполняемые нами инвазивные процедуры (скажем, абляция устьев легочных вен при фибрилляции предсердий или стентирование коронарных артерий при стабильной ишемической болезни сердца) только в очень редких случаях могут повлиять на прогноз заболевания, а в подавляющем большинстве они не снижают смертность или вероятность инфаркта. Тогда появилась теория, что они улучшают качество жизни. Но уже есть достаточно много исследований, показавших, что и качество жизни они не очень улучшают.

Сейчас мы видим, что три месяца эти процедуры практически не выполнялись, — и что? И ничего. Мы каждый год увеличиваем количество стентирований, коронарных шунтирований, абляций и т.д., но смертность не снижается. А ведь смертность от болезней системы кровообращения в России — это половина всей смертности, причем почти две трети в ней от ишемической болезни сердца. И выходит, что мы лечим все активнее, все дороже, все агрессивнее и все высокотехнологичнее, а негативная статистика почти не меняется. Поэтому мне кажется, что произойдет очень серьезный пересмотр лечения пациентов с заболеваниями системы кровообращения во всем мире. И это еще один важный урок нынешней эпидемии. ■

Беседовала Наталия Лескова

О ЧЕМ РАССКАЗЫВАЮТ ЛЬДЫ





На Земле есть образования, которые буквально запечатывают информацию о прошлом нашей планеты и хранят ее долгие годы. Ледяной керн, добытый на Северном полюсе, может многое рассказать о составе атмосферы или температуре в тот или иной период. О работе гляциологов, экспедициях в суровых условиях и самых красивых объектах на Земле — наша беседа со **Станиславом Сергеевичем Кутузовым**, кандидатом географических наук, заведующим отделом гляциологии Института географии РАН, вице-президентом Международной ассоциации криосферных наук (*International Association of Cryospheric Sciences, IACS*).

— Станислав Сергеевич, чем занимается современная гляциология?

— Гляциология — это наука о природных льдах на поверхности Земли, в атмосфере и других оболочках. Это достаточно молодая наука, но при этом бурно развивающаяся. Как и многие другие науки, она претерпевает революцию методов, которая связана с массовым распространением данных дистанционного и спутникового зондирования.

Причиной бурного развития гляциологии стали климатические изменения. Здесь гляциология находится на передовой исследований, поскольку ледники, снежный покров и другие элементы криосферы меняются очень быстро. Наблюдение за ними крайне важно для понимания внутренних

процессов. Это позволяет специалистам строить правильные модели происходящих изменений и влияния на другие оболочки планеты — например, на рост уровня Мирового океана или на речной сток. Любой ледник или снежный покров — это вода в замерзшем виде. Соответственно, от того, как быстро ледники или снежный покров будут таять, зависят благополучие и безопасность человечества.

— О чем могут рассказать специалисту-гляциологу те или иные виды льдов?

— В гляциологии существует целый ряд разных научных направлений. Кто-то занимается анализом процессов накопления или расхода вещества, то есть таяния льдов, а есть специалисты, которые применяют методы палеоклиматологии. Ледники



Установка абляционных реек на леднике Гарабаши. Фото: Сара Дель Бен.

ежегодно накапливают снег. Для гляциологов это ценная историческая информация. Путем бурения мы добываем эту информацию из недр ледника.

Ледяной керн может рассказать о составе атмосферы, а изотопный анализ снега — какая была температура в тот или иной период. По сути, анализ ледников позволяет, пусть и косвенно, реконструировать климат.

Кроме того, продолжаются исследования, связанные с течением ледников, со свойствами природных льдов. Сегодня специалисты пытаются понять, как функционируют эти объекты.

— В гляциологии есть классическое разделение на специалистов-теоретиков и специалистов-практиков?

— И да, и нет. Конечно, специалистов-гляциологов готовят в университетах. Однако зачастую в гляциологии применяется набор методов из других наук. Речь идет о методах химических исследований, физическом моделировании, структурной гляциологии, о массовом использовании геоинформационных технологий, данных дистанционного зондирования, картографии и многих других.

Безусловно, крайне важно знать свой объект исследования. Любые данные спутникового зондирования должны быть верифицированы наблюдением. Поэтому истинные гляциологи — это специалисты, работающие в поле, то есть непосредственно на ледниках, о характеристиках которых они знают все.

— Чем гляциологи занимаются во время экспедиций? Какое оборудование используют? Как собирают и обрабатывают данные?

— Наш отдел в Институте географии РАН, например, занимается изучением ледников. Их можно увидеть в горах и полярных районах. Это совершенно разного рода экспедиции, но так или иначе все они связаны с суровыми условиями.

Высокогорные экспедиции предполагают работу на большой высоте, сложный процесс поставки оборудования, установку различных приборов от метеостанции до техники для бурения и т.д.

В полярных районах работать еще сложнее, особенно с точки зрения логистики. Здесь требуется еще больше разного оборудования. К тому же необходимо поддерживать удаленные станции, такие как российская антарктическая станция «Восток», на которой постоянно работают люди.

Помимо льда большой интерес для гляциологов представляет снежный покров. Специалисты проводят снегомерные работы, исследуют лавины и наблюдают за покровом морского льда в Арктике. Каждая экспедиция по-своему уникальна с точки зрения задач.

Специалисты нашего отдела чаще работают именно в горах. Где-то удается использовать транспорт, вертолеты, а иногда грузы приходится доставлять с помощью мулов или носильщиков.

Чем выше нам удастся подняться, тем будет лучше лед для анализа. Талая вода вымывает важную информацию. Недавно мы побывали в Перу на высоте 6768 м. Настоящий альпинизм. При этом важно собрать нужные образцы в целостности.

— Какова средняя продолжительность экспедиций?

— Если говорить о тех экспедициях, в которых участвуем мы, то, как правило, они занимают от недели до трех месяцев. Непосредственная работа на леднике и бурение длятся около двух недель. Но до места нужно добраться, и это не всегда легко.

Если говорить о работах в Антарктиде, то летний сезон продолжается несколько месяцев. А зимовки — до полугода лет.

— Есть ли разница между льдами на Южном и Северном полюсах?

— Льды формируются по-разному. Это зависит от того, как замерзала вода. Ледники, например, образуются без участия талой воды. Такой лед называется рекристаллизационным. В суровых холодных условиях снег постепенно спрессовывается, превращаясь в фирн. Затем воздушные поры замыкаются и на глубине 70–80 м образуется уже классический для нас лед.

В умеренных широтах, где периодически случаются оттепели, снег сразу превращается в лед из-за таяния и последующего замерзания.

Кроме того, в зимнее время мы видим лед на поверхности водоемов — так называемый конжеляционный лед.

На Северном и Южном полюсах лед действительно различается. На Северном преобладает морской лед, а на Южном — классический рекристаллизационный.

— Много ли в мире специалистов-гляциологов?

— Ответ на этот вопрос во многом связан с тем, кто себя считает гляциологом, а кто химиком, исследующим ледники, или картографом, который в том числе занимается изучением ледяного покрова. В целом

это сообщество достаточно большое — около 1 тыс. человек. В России таких специалистов больше 100. В конференциях, как правило, принимают участие около 200 человек. Конечно, по сравнению с другими научными сообществами из области физики или химии специалистов-гляциологов не так много. Но исследования проводятся достаточно активно. Наш сотрудник А.Ф. Глазовский выпускает газету «Еженедельная гляциология», или *Glaciology Weekly*. Каждую неделю в ней публикуется около 20–30 новостей о новых исследованиях по нашей тематике.

— Над чем вы сейчас работаете? Какие задачи решает ваш отдел в Институте географии РАН?

— В первую очередь, отдел занимается изучением реакции ледников на изменения климата. Исследование ведется в нескольких направлениях. В частности, это традиционные прямые измерения баланса массы ледников, которые проводятся ежегодно. В прошлом году совместно с Томским государственным университетом нам удалось восстановить ряд важных наблюдений на леднике Левый Актру на Алтае, которые были приостановлены в 2012 г. Сегодня мы пытаемся привлечь к этой работе и студентов, чтобы создать новую школу гляциологии в ТГУ. Помимо этого мы проводим наблюдения на леднике Гарабаши на Кавказе. Некоторые изменения оцениваются дистанционными методами. Благодаря этой работе создаются новые каталоги ледников в нашей стране.

Я сам принимаю участие в исследовании ледниковых кернов. Это очень интересное направление, словно ты вовлечен в настоящее детективное расследование, пытаешься узнать, что же было раньше. Анализируя каждый слой, вы постепенно восстанавливаете историю этого места, того, как менялся климат, и т.д.

Моя тема исследования связана с переносом пыли. Оказалось, что на Кавказ пыль приходит из пустынь Ближнего Востока и Северной Африки. Исследуя лед Эльбруса на высоте 5 тыс. м, мы можем узнать, как менялись климат и природные условия Ближнего Востока и Африки.

Сегодня одно из важных направлений связано с геофизическими исследованиями. До сих пор не решен вопрос о том, сколько всего льда на нашей планете. А каков рельеф подледного ложа конкретных ледников? На эти вопросы мы пытаемся найти ответы с помощью радаров и уже измерили толщину льда в разных районах: на Кавказе, в Перу, в Тибете, Арктике и Антарктиде.

Активно развиваются направления математического моделирования и палеоклимата. Специалисты занимаются датировкой морен. Морены образуются в результате движения ледников. Это смесь обломочного материала — от гигантских глыб, имеющих до нескольких сотен метров в поперечнике, до глинистого материала, образованного в результате перетирания обломков при движении ледника. Датировка морен позволяет восстанавливать прошлое ледника.

Окончание бурения на вершине горы Уаскаран, Перу (6768 м). Фото: И.И. Лаврентьев.



*Доставка снаряжения
на Западное плато Эльбруса (5100 м).
Фото: Сара Дель Бен.*



— А что насчет будущего? Могут ли характеристики льда рассказать специалисту, что будет дальше?

— Все палеоклиматические реконструкции нацелены на то, чтобы улучшить наши климатические модели. Сложность в том, что мы имеем дело с коротким периодом наблюдений — порядка 100 лет. При этом период спутниковых наблюдений еще меньше. Проводя аналогии, выделяя связи, мы восстанавливаем крупицы информации, которые потом используем в математических моделях. Затем модели проверяются с помощью анализа ледяных кернов.

— Существует несколько точек зрения на изменение климата. Кто-то считает, что имеет место естественный процесс, а кто-то уверен, что на климат влияет антропогенный фактор. Что могут сказать гляциологи?

— Безусловно, именно мы первыми видим, как меняется климат. Каждый год, приезжая на объекты, мы сразу замечаем, насколько быстро, например, происходит деградация оледенения в горах Кавказа, Алтая и других местах.

Темпы изменения площади, объема, потери массы ледников сегодня самые быстрые за всю историю наблюдений. За некоторые колебания действительно ответственны природные циклы. Но в целом наблюдения указывают на то, что такие ускоренные темпы таяния не объясняются влиянием только природного фактора.

Между тем нельзя просто сопоставить графики температуры и таяния льдов. Формирование ледников — сложный процесс. Необходимо учитывать энергетический баланс, тепловой баланс, который зависит и от радиации, и от альбедо поверхности или отражающей способности. Здесь множество обратных связей и зависимостей.

Например, если снег тает быстрее из-за солнечной радиации, то открывается поверхность льда. Лед намного темнее,

соответственно, таяние происходит еще интенсивнее. При изменении угла наклона лед начинает быстрее течь и т. д.

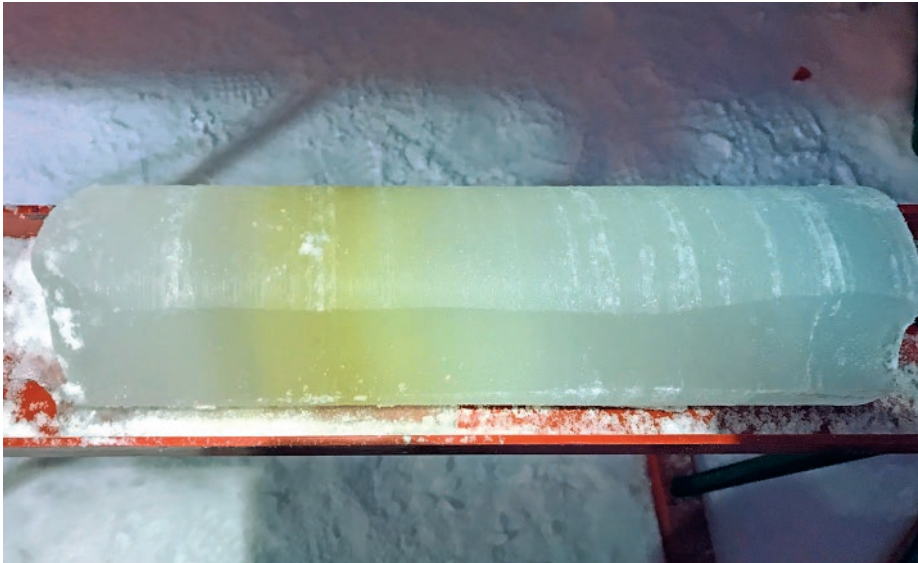
Разумеется, климатологи и гляциологи предпринимали попытки проанализировать процесс таяния ледников и оценить влияние человека. Модели показывают, что современное состояние ледников, которые тают повсеместно, нельзя объяснить естественными причинами. Непосредственное влияние человеческой деятельности вносит значительный вклад в этот процесс.

Однако связать таяние конкретного ледника с антропогенным фактором действительно сложно. Конечно, если речь не идет о добыче полезных ископаемых рядом с ледниками. Например, на высокогорном золоторудном месторождении Кумтор в Киргизии ледник был физически удален. На те ледники, которые не были затронуты механическим воздействием, влияние добычи полезных ископаемых незначительно или полностью отсутствует. При этом они все равно сокращаются.

Ледники — это продукт климата. Баланс массы ледника зависит от соотношения аккумуляции и таяния, то есть фактически от количества зимних осадков и температуры воздуха. Это те показатели, которые мы можем измерить. На репрезентативных ледниках измерения проводят очень тщательно. В большинстве горных районов осадки меняются слабо или не меняются вовсе. Но даже незначительный рост не может компенсировать усилившегося таяния ледников за счет повышения температуры.

В ряде районов существуют и свои дополнительные факторы, которые влияют на процесс таяния. Например, на Кавказе и в Альпах возрастает уровень приходящей солнечной радиации за счет сокращения облачности в летний период. А это еще сильнее усиливает таяние.

Полученные данные, в том числе собранные благодаря спутниковому зондированию, говорят о том, что во всех крупных



Слой пыли из пустынь Северной Африки в керне Эльбруса. Фото: Сара Дель Бен.

горных районах мира ледники теряют массу. Хотя и здесь есть некоторые аномалии. Известно, что ледники в горах Каракорума и Куньлуня не только не теряют массу, но даже постепенно увеличиваются в размерах. Считается, что «каракорумская аномалия» связана с изменением облачности и увеличением осадков. К тому же речь идет о достаточно больших высотах. Сейчас этот регион активно изучают. Однако даже в случае Каракорума прогнозы неутешительные: к концу века многие из ледников ждет полное исчезновение.

— Чем это чревато?

— Все мы знаем, что ледники — это источники воды. Основной вклад в прирост уровня океана происходит за счет таяния ледниковых покровов Гренландии и Антарктиды. Все остальные ледники, включая небольшие горные, содержат чуть больше 30 см слоя воды. Может показаться, что это не так много, но уже сегодня горные ледники за счет быстрого таяния вносят ощутимый вклад в повышение уровня Мирового океана, сравнимый с Гренландией.

Для предгорных районов основные последствия также связаны с водой. Ледники представляют собой естественные водные резервуары. Они накапливают воду, задерживают ее и в течение теплого сухого периода отдают. Для регионов с сухим и жарким климатом (тропические Анды, Боливия, Перу, Средняя Азия и др.) ледники — это главный источник воды, в том числе для крупных городов.

На взгляд обывателя может показаться, что если ледники тают быстрее, то воды

становится больше. Однако в какой-то момент площадь ледников уменьшится настолько, что ледниковый сток практически исчезнет. Речь идет о так называемом пике стока. И во многих горных районах он уже пройден.

Нельзя не упомянуть экономические последствия, особенно в сфере горнолыжного туризма. Уже сейчас в Приэльбрусье канатные дороги строят все выше, а трассы расширяются. За последние 20 лет объем ледников здесь сократился на 23%. Сокращение продолжительности горнолыжного сезона при-

несет серьезные убытки.

Глобальные проблемы связаны с таянием ледников Антарктиды, Гренландии. Как я уже сказал, это приведет к росту Мирового океана. Ранее считалось, что ледниковые шапки достаточно стабильны, а их таяние занимает сотни и тысяч лет даже при условии роста температуры. Однако последние исследования говорят о том, что эта стабильность серьезно нарушена. В отчетах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) эта тематика рассматривается в качестве проблемы устойчивости западного арктического щита, который фактически представляет собой нематериковый щит. Ведь в данном случае большая часть континента находится под водой. При усиливающемся таянии и отколе больших айсбергов, то есть распаде шельфовых ледников, встает вопрос о стабильности. Если распад продолжится, то уровень океана будет расти быстрее. Согласно худшему сценарию, к концу XXI в. уровень Мирового океана вырастет на 80 см, а в течение ближайших столетий — до 2,5–5 м.

Консенсус по поводу причин резкого изменения климата достигнут. Однако остались вопросы о механизмах, обратных связях, внутренней изменчивости климатической системы. Мы еще многого не знаем о прошлых климатических изменениях, и пока данных недостаточно. Тем не менее математические модели указывают на то, что климатические изменения не могут быть объяснены естественными причинами. И процесс ускоряется.

— Анализируя ледниковые керны, замечаете ли вы последствия загрязнения атмосферы?

— Да, конечно. Например, керн с Эльбруса сильно отличается от керна, полученного в Альпах. Дело в том, что на Эльбрус попадает загрязнение не только из стран Западной Европы, но и со стороны Восточной Европы, Ближнего Востока и юга России. Особенности заметны сразу. В Альпах отчетливо видны изменения, связанные с тем, что в 80-х гг. XX в. в Европе были приняты законы по снижению выбросов сульфатов. Непосредственное изучение льда стало доказательством эффективности этих мер. На Эльбрусе же резкого снижения уровня загрязнения сульфатом не наблюдается, что связано с менее жесткими экологическими требованиями в странах-эмитентах.

Недавно совместно с итальянскими коллегами мы опубликовали статью о новых типах загрязнителей — полициклических ароматических углеводородах (ПАУ). В статье также была отражена история развития промышленности в советское и постсоветское время. Возможно, звучит удивительно, но на керне четко отражены периоды застоя, распада СССР и резкого роста содержания веществ после 2000-х гг. Ледники — это независимый архив информации. И если данные в национальных каталогах эмиссий можно подделать, в ледниках хранится достоверная информация не только об истории климата, но и о загрязнениях атмосферы.

— Как связана деградация вечной мерзлоты с таянием ледников?

— И вечная мерзлота, и ледники представляют собой элементы криосферы, которые реагируют на изменение климата. Многолетнемерзлые породы также реагируют на повышение температуры воздуха, происходит отепление толщи и увеличение слоя сезонного оттаивания. Для России деградация вечной мерзлоты связана с большими рисками. Известно, что гигантская территория нашей страны занята вечной мерзлотой. Инфраструктура на этих территориях построена по принципу сохранения мерзлоты и использования ее в качестве фундамента.

Многие бьют тревогу, считая, что города, построенные на вечной мерзлоте, буквально завтра начнут разрушаться. Это не совсем верно. Инфраструктура построена человеком, следовательно, существуют правила строительства и эксплуатации, процедуры

по искусственному охлаждению свайных фундаментов, поддержке мостов и т.д. Конечно, эти процедуры требуют средств, проведения соответствующего мониторинга. Пусть этот процесс не мгновенный, но он уже запущен. Если ничего не делать, потом действительно будет поздно, а восстанавливать придется за еще большие деньги.

— Какие меры нужно принять уже сегодня, чтобы замедлить процесс?

— Меры, предложенные научным сообществом, уже инициированы. Необходимо запустить два параллельных процесса — снижение выбросов и недопущение худшего сценария, а также создание механизмов адаптации к неизбежным изменениям.

Вот лишь несколько примеров возможных адаптационных мер. Необходимо разрабатывать новые правила строительства и мониторинга сооружений, построенных на вечной мерзлоте. В горах должна развиваться система раннего предупреждения опасных процессов. Нужна совместная работа ученых и муниципальных властей, которая позволит своевременно принять верные решения до трагедии, а не после нее. Остановить потепление с завтрашнего дня нам не под силу. Но есть целый ряд мер, которые позволят уменьшить негативные последствия. Однако решения, которые дадут возможность не допустить худшего сценария, должны принимать не ученые, а политики.

— Что нужно знать молодому человеку, который решит стать гляциологом?

— Я выбрал эту сферу, потому что объекты моих наблюдений безумно красивые. На мой взгляд, ледники — одни из самых живописных объектов на Земле. И если у вас есть жилка исследователя, тяга к знаниям и неизведанному, то гляциология — отличный выбор. Вас ждут не только работа в лаборатории и научная деятельность, но и интересные экспедиции, возможность посмотреть на ледники из космоса и многое другое.

Кстати, совсем недавно появилось новое направление — космическая гляциология. Ведь ледники есть не только на нашей планете. Я помню анекдотическую ситуацию, когда появилась фотография Марса со слоями марсианского льда. Коллеги из лаборатории по изучению кернов шутили: «Следующая точка бурения будет на Марсе».

Я уверен, что гляциология продолжит развиваться и дальше. В этой сфере можно построить отличную карьеру. ■

Беседовала Анастасия Пензина

«COVID-19 РАЗРУШИЛ БАРРИКАДЫ МЕЖДУ НАУКОЙ И МЕДИЦИНОЙ»



Молекулярные биологи умеют предвидеть возможные опасности для человечества и могут предлагать лекарства и технологии, способные не допустить тяжелых осложнений и калечащих операций. Однако врачи далеко не всегда готовы услышать эти предостережения и нередко включаются в работу лишь в тот момент, когда болезнь уже началась. У них есть свои претензии к молекулярным биологам, предложения которых, на их трезвый взгляд, не всегда близки к клинической практике.



Как совместить эти две позиции и сделать так, чтобы наука и практика стали союзниками в борьбе за качество и продолжительность человеческой жизни? Об этом — дискуссия академика **Дмитрия Юрьевича Пушкаря, главного уролога Минздрава и ДЗМ, и кандидата биологических наук **Марины Викторовны Грановской**, присоединенного профессора Института системной биологии Ирландии.**

Д.П.: Много лет назад, когда мы начали заниматься робот-ассистированной хирургией, было понятно, что надо инкорпорировать системных молекулярных биологов, и не просто для того чтобы они нас чему-то научили, а для того чтобы принимать ежедневное взвешенное решение по каждому конкретному больному. В этом смысле Марина Викторовна — специалист высочайшего класса, которая привнесла в нашу ежедневную практику очень много важного и нужного. Мировоззрение системных биологов — это то, чего нам, клиницистам, сегодня не хватает.

М.Г.: Дмитрий Юрьевич, спасибо за теплые слова, но позвольте напомнить: мы, молекулярные биологи, давно рвались к вам, клиницистам, с информацией о том, что у нас все готово для трансляционной медицины. У фундаментальной науки есть проработанные и доказанные прикладные решения для медицины, переведенные с языка науки на язык ежедневной медицинской практики. И если бы не ваша открытость и готовность прислушаться, мы бы к вам так и не прорвались.

А ведь не все так открыты! Нас, готовых предложить новые решения, много. Но дело в том, что у нас, биологов, нет с вами, практиками, этого связующего моста, по которому мы могли бы свободно приходиться друг к другу за видением, методами, запросами, задачами и решениями. Поэтому мне кажется, что наш с вами опыт уникален, особенно сейчас, в такой сложный период, который пережил весь мир. Именно сейчас нам удалось забить крепкие сваи для этого моста.

Д.П.: Мы действительно начали совместную работу очень давно, ее основным результатом — препарат фавипиравир, о котором сегодня говорит весь мир. В то же самое время он разделил медицину, потому что *COVID-19* превратил ее в экстренную помощь. Это страшная медицина, мы такой не хотим. Ведь первые миллион-полтора больных в мире мы лечили вообще неизвестно чем.

М.Г.: Это правда. И поэтому мы, биологи в разных странах, стучались во все клиники и говорили: коллеги, мы же предупреждали, что нужно создавать возможности для репозиционирования



препаратов. Мы хором кричали о том, что нужно встраивать в медицину возможности действовать от механизма поломки, учитывая причинность возникновения различных заболеваний, а не бороться со следствиями этих поломок. Но, увы, только чрезвычайная ситуация позволила прорвать баррикады между биологией и медициной и начать действовать сообща, причем не только молекулярным биологам, но и структурным химикам, биоинформатикам, иммунологам.

Д.П.: Репозиционирование препаратов, или допущение нового их применения, выходящего за рамки первоначальных медицинских показаний для существующих лекарств, — это крайне важно, и мы это понимаем. В результате сегодня мы имеем наиболее эффективный препарат у больных коронавирусной инфекцией.



М.Г.: Здесь важны два ключевых момента: применение известного препарата в новом показании и комбинированная терапия. SARS-CoV-2 в отличие от других коронавирусов обладает свойством причинять множественный вред организму, а не локальный, как другие ОРВИ. Казалось бы, он просто заходит в верхние отделы дыхательных путей, прикрывшись «шапкой-невидимкой» за счет выключения немедленного реагирования — интерфероновых сигнальных путей иммунной системы. При этом он несет с собой в «потайном кармане» крошечный неструктурный белок, который тут же включает систему инфламмосомы.

Что это такое? Это бомба быстрого действия, которая активирует цитокиновый шторм и совершенно неконтролируемый ответ иммунной системы. И для нас, молекулярных биологов, понятно, что эта граната обязательно рванет: пойдет

по всем системам организма, запустив мощнейший, драматический иммунный ответ. Ученые с самого начала ясно видели, что одним препаратом здесь не справиться. В принципе, вирусная инфекция в здоровом организме должна проходить сама. Врачи всегда довольно скептически относились к лечению насморка. Но здесь она сама пройти не может, потому что вирус подрывает несколько витальных для организма систем на корню.

Д.П.: Но она очень у многих проходит сама.

М.Г.: Такое возможно. Эта болезнь проходит сама, если иммунная система не сразу поддается на провокацию и справляется, включив T-клеточный ответ.

Д.П.: То есть здесь задействован иммунитет и больше ничего?

М.Г.: Только для легкого течения. В случае тяжелого течения это многофакторное заболевание. За такое короткое время, которое длилась пандемия (а для вируса это ничтожно мало), не могло произойти аттенюации, или ослабления. Тем не менее вирус умудряется мутировать. И некоторым счастливицам везет получать не особенно «злобные» и коварные формы. Однако не будем приуменьшать возможные опасности. Вирус ужасен тем, что имеет тропизм (сродство к множественным тканям организма) не только к легким, где его основная мишень, но и к клеткам желудочно-кишечного тракта, к миокарду, к эндотелиальным клеткам. Он активизирует мощнейший ответ нейтрофилов, которые дальше провоцируют тромботические ответы эндотелия и системы комплемента. У некоторых людей это все происходит агрессивно, у некоторых благодаря генетическим, эпигенетическим и прочим факторам — в более мягкой форме.

Д.П.: Эти факторы, к сожалению, не изучены.

М.Г.: Да, это так. Достоверно известно, что некоторые люди в хосписах, которые одним пальцем держались за жизнь, спокойно переболели. Многие врачи, которые в ковидных отделениях работали, не заразились. А другие — сильные, вроде бы здоровые — умерли, хотя все ожидали их выздоровления.

Д.П.: Когда началась эпидемия, наш госпиталь, как и многие другие, переключился на помощь таким пациентам. На сто процентов это была ковидная больница. И мы, конечно, искали научные труды, которые можно непосредственно приложить к этим пациентам, чтобы им помочь. Нашли ничтожно мало. Это ферменты, цинк, витамины E и D. Но это все было абсолютно бессистемно.

М.Г.: Да, но потом мы начали все это обсуждать и выстраивать систему. Нам помогло знание молекулярных механизмов действия вируса и ответа организма. В этом и состоит задача системного подхода — собрать по кусочку весь изученный матери-

ал, как пазл, в единое целое. Здесь, конечно, должен сработать высокий профессионализм — ваш, клиницистов, и наш, ученых. И такие диалоги, где люди садятся мультидисциплинарной командой и принимают взвешенные решения, очень важны.

Д.П.: Но сегодня получается, что мы имеем всего три-четыре препарата, которые подходят для лечения этой вирусной инфекции. Почему же репозиционирование произошло только с этими препаратами? И будущее ли это для нашей медицины?

М.Г.: Для нас, биологов, это настоящее. Количество открытых, изученных, нетоксичных, эффективных молекул превышает те показания, в которых они даются. Почему? Раньше, 20 лет назад, лекарственные мишени выбирали так называемым редукционистским подходом — путем упрощения синдрома до одного, как казалось, ведущего механизма; путем изучения взаимодействия одного рецептора с одной ведущей сигнальной системой. И все считали, что если поезд — сигнал — у нас пошел по неправильным рельсам, нарушил стройную сигнальную цепь, выбрал неправильную скорость или уехал в путешествие без тормозов, то нам нужно просто-напросто перекрыть его выход из депо и это решит проблему заболевания целиком. Когда в науку пришли новые технологии, когда мы смогли картировать сигнальные пути, произошел перелом. Это все равно что нанести на карту все рельсы, сделать *Google Maps* всех взаимодействий. В итоге мы видим станции перекрестков, перевода стрелок, появилось больше мишеней, и если мы будем «стрелять» направленно по ним как новыми, так и известными молекулами, то добьемся эффекта.

Классический пример такой редукционистской ошибки и ее исправления — лечение меланомы ингибитором *Braf*. Это белок, который мутирует при меланоме, в результате чего клетки теряют контроль над клеточным циклом. Его ингибирование оказалось недостаточно, потому что выключая возможность передачи сигнала от *Braf*, лекарство также выключало акцептор отрицательной обратной связи от всей длинной сигнальной цепи, который говорил ей о том, что сигнал воспринят и нужно перестать его передавать. Убрав *Braf*, мы лишали клетку возможности понять, что сигнала поступило достаточно и пора прекратить активировать цепь, то есть выпускать паровозы из депо. И клетка решала: если моя сигнальная система говорит, что можно делиться, я и буду делиться дальше, потому что сигнал «Горшочек, не вари» не поступает. В результате процесс опухолеобразования сначала приостанавливался, а потом взрывался с новой силой.

И только когда мы сделали картирование сигнальных путей и предложили новый подход — параллельное ингибирование *Braf* и последнего в цепочке осциллятора белка, который должен



был бы прийти к нему с информацией «Горшочек, не вари», — стала возможна эффективная персонализированная терапия.

Поэтому для нас, биологов, это совсем не будущее. Это настоящее, которое мы активно пытаемся пронести в любую клиническую и фармацевтическую дверь или даже окно. Есть много молекул, которые можно репозиционировать, много подходов. Есть подходы, которые позволяют «играть» с регуляцией эпигенетических механизмов, ведь они тоже сбиваются при возникновении комплексных состояний как в раке, так и в нейродегенеративных заболеваниях и в процессах старения.

Д.П.: И все-таки, если говорить о плюсах, в России все эти препараты были утверждены в рекордные сроки. Для нас, да и для всего мира это колоссальный прорыв, потому что раньше это заняло



бы годы. Сегодня после клинического испытания мы получаем временное разрешение на использование того или иного препарата и доводим его прямо к постели больного. Это огромное дело. Но есть ли сейчас в мире какие-то группы специалистов, которые работают непосредственно над созданием специфических лекарств от COVID-19?

М.Г.: Дмитрий Юрьевич, мы с вами понимаем, что это комплексное заболевание, которое затрагивает множество органов и систем. Вы мне как клиницист ответьте: может быть от него панацея или здесь налицо то, из-за чего мы с вами постоянно «бодаемся», — надо действовать системно и сочетанно?

Д.П.: Мне бы очень хотелось верить, что фавипиравир плюс иммуномодуляция, сосудистые препараты и т.д. создадут «зонтик безопасности», о котором мы сегодня говорим. Я в это верю.

М.Г.: Но есть и альтернативные возможные подходы, и над ними сейчас работают структурные химики в Америке и Германии: разобщить посадку вируса на рецептор плюс применять фавипиравир или что-то другое, блокирующее вирусную копирующую технику, и дополнить иммуномодулятором, блокирующим инфламмасому. Более того, если разобщить посадку вируса, это будет неплохим профилактическим средством, коим ни арепливири, ни авифавири нельзя назвать. Однако в биологии, как и в организме, все основано на тонкой стохиометрии, взаимодействии: вы же не можете точно рассчитать, сколько молекул разобщающего вещества понадобится для каждого рецептора, способного служить «калиткой» для вирусов. Есть такое понятие, как «протекание» сигнальных путей. Поэтому если вы даже разобщите посадку вируса на клетки и взаимодействие с рецептором, то есть вероятность, что некоторое количество вирусных частиц туда просочится.

Д.П.: Не стоит забывать и о том, что эти препараты могут быть очень токсичными. И мы это прекрасно понимаем, потому что имеем сегодня множество аутопсийных исследований. Однако исследование *post mortem* не дало нам ответов на все наши вопросы. Мы, урологи, думали, что будут какие-то изменения в почках, яичках. Мы говорили, что изменяется сперматогенез, появляются микротромбы, что приводит к тому, что, может быть, будут обнаружены новые факторы бесплодия. На самом деле все это спекуляция вокруг этой темы.

М.Г.: Не согласна с вами. Все зависит от тяжести протекания заболевания и отчасти от тропности вируса к различным органам, помимо легких, у конкретного пациента. Недавно вышло потрясающее обозрение в журнале *Nature* об исследованиях, проведенных двумя огромными госпиталями в Нью-Йорке и Пенсильвании, где речь идет о том, что затронуты и почки, и желудочно-кишечный тракт, и мозг из-за того, что происходят микротромбозы, воспаление эндотелия сосудов в качестве ответа на иммунный шторм. Мне кажется, что в исследованиях *post mortem*, которые мы успели сделать за рекордно короткие сроки, пока спасали больных, у нас не было достаточно времени, чтобы эти факторы изучить. Мы же с вами говорили об изучении не только урологического спектра органов. На гистологическом уровне, на уровне поражения эпителия мы посмотрели очень много маркеров и можем с такой же уверенностью, как американские коллеги, говорить о факторах риска, которые дифференцируют больных между состоянием относительно легким и тяжелым. И если бы мы обладали этой информацией в начале пандемии, взяв ее, скажем, от европейских или китайских коллег, то я уверена, что количество спасенных людей было бы гораздо больше.

Д.П.: Так что, сочетанное лечение?

М.Г.: Да. Нет панацеи, не надо на нее рассчитывать. Организм — штука холистическая. Невозможно лечить что-то одно, обязательно хромает что-то другое. Мы, ученые, рассматриваем клинические симптомы как езду с горки вниз для организма, когда приземление головой оземь уже почти неизбежно. То есть для нас все начинается гораздо раньше, чем для вас, — с повышения уровня определенных маркеров, изменения клеточного поведения, тончайших механизмов генной, гуморальной, гормональной регуляции. Вопреки привычным клиническим ожиданиям маркерами могут выступать не только белки, это могут быть и цитокины, и эпигенетические перестройки на уровне РНК-регуляции. То есть мы вас готовы предупредить, что вот-вот что-то грянет. А вы, клиницисты, говорите: не болит, не жалуешься, ну и хорошо — пока свободен.

Д.П.: Марина Викторовна, по вашему мнению, системный биолог должен быть на каждом консилиуме, когда речь идет о тяжелом больном? Или, может быть, он становится неким фильтром, который оценивает и назначает сегодня какие-то базовые анализы в зависимости от возраста пациента? Как вы это видите? Я хочу понять, как непосредственно мы можем транслировать это в рутинную клиническую практику.

М.Г.: Системный биолог — это некий волшебный сундук с большим количеством знаний о том, как работают механизмы сложных, многокомпонентных, многофакторных заболеваний. Что такое сложное заболевание? Это такое заболевание, в котором участвует не одна система органов и тканей, не один клеточный рецептор и сигнальная система, а много, и они ведут друг с другом диалог. Системный биолог может показать, какие слова из этого диалога будут значимы для вас — клиницистов, чтобы понимать, какой прогноз у данного пациента, как будет развиваться заболевание, какие лекарства показаны более, какие — с вероятностью меньшего эффекта. И, безусловно, системный биолог может показать те поляны, где стоит искать новые мишени в случае очень тяжелых состояний, либо те, где надо искать лекарства. Такой специалист может повлиять на одну систему организма, активизировав другую, применив причинный холистический подход.

Д.П.: Клиницисты к этому готовы.

М.Г.: А мне кажется, что нет, потому что в инструкциях для препаратов написаны стадии. Наша же задача — не допустить развития стадий.

Д.П.: То есть вы говорите о том, что сегодня клинические биологи готовы к тому, чтобы по ряду заболеваний предложить системный подход к ранней диагностике, а если уже имеется заболевание, то возможное изменение лечения?

М.Г.: Да. На основе интегративных маркеров, которые имеются в лаборатории. Это технологии,

которые позволяют картировать белковые пути, делать репертуар цитокинов, карты эпигенетических маркеров. Технология есть — значит, можно выстроить любое ее применение. Вопрос в готовности клиницистов мыслить системно.

А вообще хочу вам сказать спасибо за возможность ведения больных во время этой эпидемии. Для меня как для ученого колоссальное счастье — висеть на телефонной трубке с вами и вашими коллегами и стараться помочь пациентам, отслеживая биомаркеры прямо в процессе, корректируя схемы лечения.

Д.П.: Уверен, что наши специалисты объединятся и будут очень рады такому сотрудничеству, будь то урологические, неврологические, онкологические или любые другие заболевания. Подобные совместные исследования имеют огромный смысл и полностью меняют картину современной медицины.

М.Г.: Речь идет об интеграции науки, технологий и медицины. Вопрос — готовы ли мы ментально ко всему этому? Готовы ли клиницисты работать не только с тем, что у меня болит бок, а с тем, что у меня маркеры куда-то отклонились?

Д.П.: Вы правы. Но ваша конструктивная критика поможет изменить эти клинические рекомендации, потому что сейчас, если говорить о той же онкологии, мы используем те или иные схемы уже тогда, когда, к сожалению, находимся на стадии химиотерапии.

М.Г.: А мы можем эти схемы принципиально улучшить. Это относится далеко не только к вирусным заболеваниям типа *COVID-19*. Это вся аутоиммунная панель — болезнь Крона, ревматоидный артрит, рассеянный склероз, то есть все заболевания, где происходит масштабный сбой иммунной системы, реагирования *B*- и *T*-клеток, онкология, и мы можем систематизировать и понять, как лучше заходить с клиническими решениями. Речь будет идти о разработке новых подходов.

Д.П.: Вот мы с вами разговариваем, и я вижу другую урологию. Таковую, которая будет, например, удалять предстательную железу только тогда, когда без этого обойтись никак нельзя. Вы мне говорите: «Дмитрий Юрьевич, через пять лет у этого больного на 99% начнется метастатический процесс». И мы удаляем предстательную железу. Но если прогноз другой, мы не станем ее удалять. Ситуация меняется прямо на наших глазах. Мы ведь еще 20 лет назад думали, что простатспецифический антиген (ПСА) — это бином Ньютона в урологии, то есть вся информация о пациенте в одном флаконе. Мы думали, что берем анализ крови и все знаем про пациента. Сегодня мы прекрасно понимаем, что это не так. Мы преломляем ПСА с МРТ, с КТ, с ультразвуком и т.д. Уверен, что такие трансформации будут происходить со всеми областями медицины.

М.Г.: Но мы же с вами обсуждали это на примере конкретных пациентов. Помните, я рассказывала

вам о нашем совместном исследовании с коллегами в Немецком центре исследования рака в Хайдельберге, где для пациентов с раком простаты мы расшифровывали секретом — то есть все то, что выделяется в кровь при течении заболевания. И получили четкое разделение пациентов, которые не пойдут по пути метастазирования или пойдут отсроченно, и пациентов, которых уже нужно лечить дополнительными схемами, чтобы предотвратить метастазирование.

Д.П.: Но эти технологии не внедрены до сих пор. Я был в Хайдельберге и рассказал об этом. Люди округлили глаза и сказали: этого даже рядом нет. И все продолжают отрезать предстательную железу. Поэтому, подводя итог, я хотел бы сказать, что *COVID-19*, с одной стороны, систематизировал знания и подходы, а с другой — дал нам понять, что мы порой неспособны противостоять новой инфекции, если у нас не будет профилактики, системного подхода и готовности репозиционировать лекарства.

М.Г.: Давайте отделим мух от котлет. В случае с *COVID-19* репозиционирование было единственным способом, потому что нам нужна была проверенная молекула. Одновременно необходимо было быстро ослабить иммунный шторм, атаку на легкие и тромбоз. Поэтому мы применили сочетанное лечение. Теперь нам нужно эту схему отработать и оправдать. Это одна история.

А движение в сторону персонализированной и прецизионной медицины — совершенно другая история. Она тоже делится на два направления. Первое — это превентивная медицина. Первый кейс превентивной медицины было опубликовано еще в 2012 г., восемь лет назад, когда Майкл Снайдер, известный генетик, профессор Стэнфордского университета, сделал индивидуальное профилирование всех своих омиксных показателей: генома, эпигенома, протеома, метаболома, — и сказал: «Боже мой, я ходил под риском диабета столько лет, а теперь я знаю, что мне делать, и у меня показатели инсулинорезистентности упадут». И он изменил образ жизни, действительно добившись замечательных результатов. Это не клиническая, а превентивная медицина, которая приводит к тому, что вы, клиницисты, имеете меньше головной боли, потому что к вам приходит меньше тяжелых пациентов.

Вторая ветвь — когда все-таки случилось заболевание, и мы, биологи, помогаем вам препарировать его механизмы до мельчайших деталей и строим четкие и подробные мостики взаимодействий разных систем внутри организма, так что вы можете с большей легкостью принимать решения и предугадывать последствия, чтобы их предотвратить. Вот это медицина будущего, причем самого скорого. ■

Подготовила Наталья Лескова

ВСЕВИДЯЩИЙ УЛЬТРАЗВУК

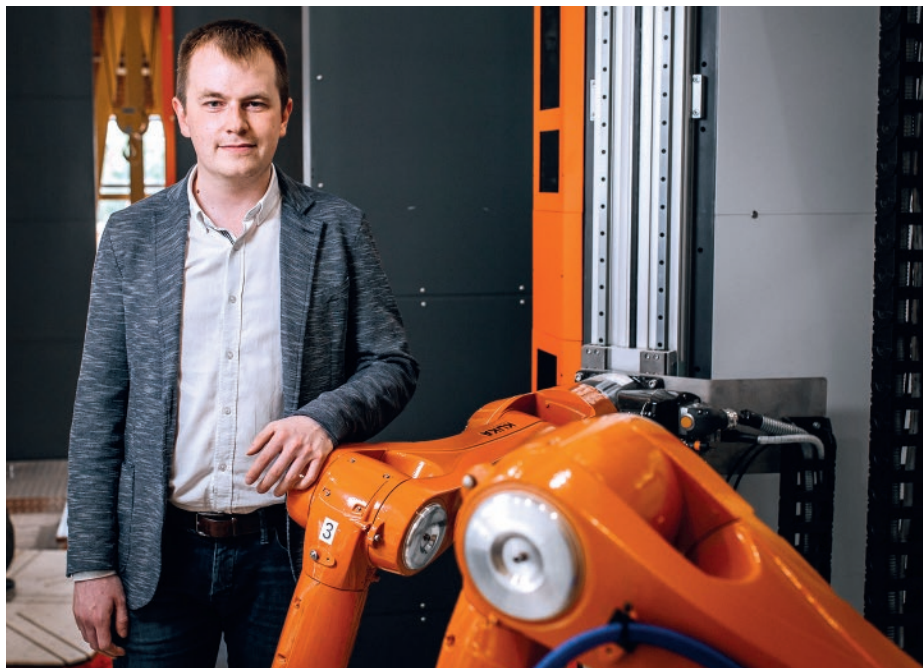
Разработки томских ученых и инженеров в области неразрушающего контроля можно встретить в самых разных странах. Приборы помогают искать дефекты в важнейших деталях газопроводов, самолетных двигателей, на границе Малайзии и Сингапура — проверять крупногабаритные грузы. Инженерная школа неразрушающего контроля в Томском политехническом университете сегодня входит в топ-10 организаций неразрушающего контроля России, а ее разработки позволили томскому вузу войти в число крупнейших экспортеров страны. О том, какие научные исследования лежат в основе этих разработок, рассказал руководитель инженерной школы и Международной научно-образовательной лаборатории неразрушающего контроля ТПУ кандидат технических наук **Дмитрий Андреевич Седнев**.



НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ



Томский политехнический университет готовится открыть со своим партнером уникальный экспериментальный участок для контроля качества важных деталей газопроводов. Скоро он заработает на площадке Томского электромеханического завода.



Кандидат технических наук
Д.А. Седнев

— **Дмитрий Андреевич, исследования, которыми занимаетесь в школе, имеют фундаментальный характер или только нацелены на внедрение?**

— Главное направление заложено в названии школы — исследования в области неразрушающего контроля. Ученые создают приборы, которые позволяют проводить контроль качества изделия, не разрушая его. При этом мы работаем и на фундаментальном уровне. Большие группы специалистов занимаются разработками в области фотоники, которая также представляет собой область наших интересов. В дальнейшем эти исследования эволюционируют и переходят на уровень промышленного применения.

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности работает в рамках всей цепочки жизненного цикла разработок — от фундаментальных исследований до конечного продукта промышленности.

— **Расскажите подробнее о главных направлениях.**

— Сфера неразрушающего контроля представляет собой область «сквозных технологий». Все опасные промышленные объекты подлежат периодическому эксплуатационному контролю, в том числе при вводе в эксплуатацию и выводе из нее. Но есть также объекты, которые необходимо контролировать во время изготовления.

Фокус нашего внимания сосредоточен на машиностроении, которое покрывает многие другие направления — от нефтяной промышленности до ядерной энергетики. Отдельно я бы выделил транспортировку нефти и газа, аэрокосмическую тематику. В последней применяются современные

композиционные материалы и аддитивные технологии. Научеёмкость таких разработок по настоящему велика.

— **Только за прошлый год ваша школа в интересах промышленных партнеров выполнила ряд работ на сумму 200 млн рублей. Как вы выстраиваете отношения с промышленными партнерами?**

— Существует сразу несколько сценариев. Например, мы оказываем экспертные услуги, используя весь накопленный опыт, обеспечивая качество создаваемых изделий. Специалисты школы разрабатывают методики контроля и обучают других.

Помимо этого, мы сами проводим контроль. В нашем распоряжении уникальная приборная база, которая в сплаве с достаточно глубокой научной экспертизой позволяет нашим партнерам получать необходимый результат. Некоторые организации обращаются к нам, когда им важно получить экспертное мнение сторонней организации для разрешения спорной ситуации.

Другой важный аспект взаимоотношений связан с обеспечением безопасности и контроля качества электронной бортовой аппаратуры. У нас есть инновационные стенды, позволяющие контролировать микросхемы и другие элементы, которые в дальнейшем становятся частью современных спутников. Благодаря специальной процедуре мы можем предсказать, насколько долго конкретное изделие будет работать в условиях космоса. На специальной площадке мы имитируем космические условия и по итогам даем заключение о возможности или невозможности применения тех или иных электронных компонентов в реальных спутниках, работающих на орбите.

И, конечно, важное направление сотрудничества связано с поставкой приборов. Например, несколько десятилетий Томский политехнический университет славится разработкой бетатронов. Они до сих пор востребованы, при этом мы постоянно совершенствуем технологию и открываем для себя новые сферы применения. Для каждого конкретного заказчика мы производим приборы с определенными техническими характеристиками. Подчеркну, что речь идет о разработке с высокотехнологичным инжинирингом и высокой степенью наукоемкости.

Для предприятий мы выполняем также научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИР и НИОКР). Подобные разработки мы создавали с нуля для *ITER* — проекта международного экспериментального термоядерного реактора, а также для компании «Газпром трансгаз» и Сибирского научно-исследовательского института авиации им. С.А. Чаплыгина.

И последнее важное направление сотрудничества с промышленными партнерами проходит в формате государственно-частного партнерства. Речь идет о совместном участии в федеральных программах и грантовой поддержке разработок для предприятий. Финансирование осуществляют и правительство, и министерства, и предприятия промышленности.

В рамках партнерства в этом году мы завершаем проект Томского электромеханического завода. Проект предполагает создание уникального комплекса по контролю задвижек клапанов для газопроводов. Подобные изделия имеют большой диапазон размеров и сильно различаются по весу — от 300 кг до 15 т. Для нас этот проект стал настоящим вызовом. Необходимо было провести исследования по многочисленным объектам, при этом сохранить качество и получить достоверный результат. К этой задаче мы подключили всех — не только специалистов нашей школы, но и физиков Инженерной школы ядерных технологий, сотрудников Инженерной школы новых производственных технологий, Инженерной школы робототехники и информационных технологий политехнического университета. Их поддержка внесла неоценимый вклад. Подобная интеграция позволяет достичь уникальных результатов и создать решения, которых не найти на рынке.

Действительно, мы стараемся работать с промышленными партнерами в разных направлениях, стремясь создавать только качественные продукты по промышленным стандартам качества и безопасности. Как мне кажется, именно такие продукты нужны индустриальным партнерам.

— Какие научные коллективы объединяет ваша школа?

— Сейчас в Инженерной школе неразрушающего контроля и безопасности работают 230 человек.

Все они объединены в разные группы. Есть два отделения, которые занимаются преподавательской и инженерной деятельностью. Отделение электронной инженерии занимается космическими технологиями. А отделение контроля и диагностики сосредоточено на приборостроении, контроле качества, техносферной безопасности и комплексном управлении безопасностью предприятия.

Помимо этого у нас есть региональный центр аттестации, контроля и диагностики, специалисты которого как раз работают с предприятиями и осуществляют консультационные и экспертные услуги, в том числе профессиональный неразрушающий контроль с выдачей всех разрешительных заключений о дальнейшей эксплуатации тех или иных приборов. Специалисты центра обучают сотрудников предприятий и аттестуют их по неразрушающему контролю.

Научное ядро включает в себя лаборатории по бетатроностроению. Одна из них работает над приборами по контролю качества, то есть дефектоскопическими бетатронами. Другая лаборатория сосредоточена на бетатронах, используемых для досмотровых целей. Речь идет о досмотре груза или багажа на транспортных средствах, пересекающих границы или подъезжающих к опасным предприятиям.

В структуру входит также Центр промышленной томографии. Он был создан при реорганизации в 2017 г. и объединил четыре самостоятельных подразделения. Нельзя не упомянуть одно из них — лабораторию теплового контроля. Профессор В.П. Вавилов — главный идеолог и разработчик всех принципов современной тепловой томографии, которые используются сегодня в России и востребованы в других странах. Например, последний заказ поступил от Министерства обороны Индии.

Другая лаборатория занимается разработкой современных бетатронов. Специалисты больше сосредоточены на исследовании — то есть на нестандартном применении этих приборов. Одно из важных направлений посвящено медицинскому применению бетатронов для интраоперационной терапии. Мы работаем в тесной связке с коллегами из Томского национального исследовательского медицинского центра РАН. Нам удалось найти промышленных партнеров — АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева из Железногорска. Они готовы предложить собственную площадку и выступить в качестве инвесторов проекта и соразработчиков. Компания имеет богатый опыт разработки высокоточных космических систем. Поэтому они смогут быстро перепрофилировать производство под разработку систем позиционирования.

Третья лаборатория, которая входит в Центр промышленной томографии, — Российско-китайская

лаборатория досмотровых систем. Специалисты разрабатывают алгоритмы обработки сигналов как для томографических, так и для досмотровых устройств. Сотрудничество с китайскими партнерами началось пять лет назад. Результат — приборы, обеспечивающие непрерывный контроль автотранспорта в Сингапуре, Китае, Малайзии. Одно из ноу-хау, которое они применили, позволяет не только видеть очертания объектов внутри грузового транспорта, но и определять за счет разности поглощения рентгеновского спектра, к какой группе атомных номеров относится тот или иной груз. Анализ проводится автоматически, после чего оператор видит сигнал о потенциально опасном объекте (взрывчатых веществах, наркотических средствах и пр.).

В сотрудничестве с коллегами из Российского технологического университета (МИРЭА) и предприятия «Диагностика-М» несколько мобильных комплексов создано и в России. Они обеспечивали безопасность на таких знаковых мероприятиях, как Олимпийские игры в Сочи, при строительстве моста через Керченский пролив. Основа мобильного комплекса — грузовой автомобиль с установленными бетатроном и детектором, который приезжает на объект и помогает при проверке транспорта.

Четвертую лабораторию — Международную научно-образовательную лабораторию неразрушающего контроля — возглавляю я. Она была создана в 2010 г. В рамках программы международного сотрудничества российских вузов и научных организаций с учеными мирового уровня и ведущими зарубежными научно-образовательными центрами в сферах науки, образования и инноваций (Постановление Правительства № 220) мы пригласили ведущего ученого Ханса-Михаэля Кренинга, бывшего директора Фраунгоферовского института неразрушающих методов контроля (Германия).

Именно он создал эту лабораторию, которая процветает и сегодня. Ученый до сих пор работает в ней и время от времени приезжает. Однако условия нынешней пандемии диктуют свои правила. Между тем Ханс-Михаэль Кренинг активно включен в деятельность лаборатории и представляет ее интересы за рубежом.

Сотрудники лаборатории разрабатывают современные методы ультразвукового и оптического контроля, а также приступают к созданию роботизированных комплексов на основе вихретоковых методов.

Каждый коллектив по-своему силен. Научная школа Томского политеха, которая была заложена достаточно давно, продолжает крепнуть в области как рентгеновского излучения, так и тепловизионных систем. Все фундаментальные исследования позволяют нам двигаться вперед уверенным шагом. И несмотря на то что история научной школы насчитывает много десятков лет, в нашу отрасль приходит много молодых ученых, которых мы сразу привлекаем к работе над большими проектами.

— Мне кажется, вы вдохновляете и собственным примером. Недавно вы получили медаль Российской академии наук. Какие исследования были отмечены этой наградой?

— Это исследование я начал, будучи студентом, когда в 2010 г. присоединился к лаборатории профессора Кренинга. Надо сказать, что мое базовое образование не связано с приборостроением или неразрушающим контролем. Я физико-техник. Область моих интересов была связана с ядерными технологиями и обеспечением безопасности атомных станций. Когда я попал в лабораторию, то открыл для себя неразрушающий контроль. При этом я продолжал работать в области безопасности и нераспространения ядерных материалов. Необходимо было решить задачу обеспечения

сохранности ядерного топлива. Ядерные отходы, как правило, помещаются в контейнеры, которые хранятся более 50 лет в специальных помещениях или резервуарах. Вы должны быть уверены, что контейнер не вскрыют, не украдут или не заменят на другой. Изучая этот вопрос, мы поняли, что неразрушающий контроль может сыграть решающую роль.

В США подобный подход применялся для контроля корпусов ракет с ядерными боеголовками в рамках договора СНВ-I. Оказалось, что сварное соединение обладает уникальными признаками: распределение крупных зерен внутри сварного соединения всегда разное. Это словно отпечаток пальца. Благодаря ультразвуковому контролю мы можем достоверно определять элементы внутри шва и точно идентифицировать контейнер. Ряд исследований



В Центре промышленной томографии ТПУ проводятся исследования современных материалов, которые используются в разных отраслях, в частности авиакосмической

Участок, созданный на ТЭМЗ, не имеет аналогов в мире. Разработчики томских политехников позволяют обнаруживать дефекты с помощью рентгена, ультразвука и лазерного профилометра.



я проводил в рамках выпускной квалификационной работы, в которой доказывал принципиальную возможность таких разработок.

Затем в аспирантуре я исследовал внешние факторы, которые могут повлиять на достоверность сигнала. Далее уже в рамках федеральной целевой программы мы разрабатывали опытную систему для ультразвукового контроля и интерпретации отпечатка сварного соединения. Работы были успешно выполнены, а диссертацию я защитил в ходе работы над проектом.

— Готовится к запуску проект с Томским электромеханическим заводом — участок для поиска дефектов в деталях газопроводов. На получение каких результатов нацелен проект?

— Это яркий пример государственно-частного партнерства, о котором я упоминал. Мы проанализировали потребности заводов, которые обновляют оборудование и ищут новые решения. Ведь разрабатывать что-то новое нужно для тех, кто создает инновационные продукты. На наше счастье, Томский электромеханический завод активно работал с «Газпромом» по программе импортозамещения. Они поставили перед собой весьма амбициозную задачу по созданию клапанов газопроводов. Ясно, что такие клапаны должны выдерживать высокое давление. Внутренние диаметры таких клапанов — от 150 до 1200 мм. В этой области особое значение отводится именно контролю качества.

Совместно с директором завода, выпускником ТПУ И.И. Пушкаревым мы решили взяться за эту задачу. Подчеркну, что проект совместный. Он касается не только методов неразрушающего контроля, но и всей цепочки интеллектуального производства. В рамках проекта мы работали сразу в трех направлениях.

Во-первых, группа специалистов создавала системы томографии крупногабаритных объектов. К сожалению, в России их не так много и нет собственного налаженного производства. Между тем наш комплекс значительно меньше, чем зарубежные аналоги. Ведь он сделан не на основе линейного ускорителя, а на основе бетатрона — малогабаритного ускорителя, разработанного в Томском политехе.

Во-вторых, мы работали над комплементарным методом контроля, отличным от традиционного — ультразвукового. Главная цель — дать оператору возможность видеть объект в режиме трехмерного изображения.

Третья задача была связана с оптическим контролем. Мы понимали, что литье, которое вышло из формы, отличается от изначальной модели. Но для того чтобы проводить ультразвуковую томографию, необходимо максимально точно позиционировать чувствительный элемент — ультразвуковой преобразователь. Речь идет о том, насколько мелкие дефекты вы сможете увидеть. Как правило, это число на уровне сотен микрометров. Важно отметить, что разница между отлитой деталью и моделью — не заводская или технологическая ошибка, а естественные технологические допуски, которые затем корректируются механообработкой.

Чтобы провести качественный контроль, нам потребовались роботизированные манипуляторы. Используя лазерные профилометры, которые помещали на роботизированные манипуляторы, мы достаточно быстро получаем облако точек, по которому уже можно выстраивать трехмерную модель конкретной задвижки. А далее в работу вступают роботы, которые осуществляют дальнейший контроль.

Сотрудничество с промышленными партнерами требует правильного выстраивания коммуникаций. Недостаточно просто говорить на одном языке, необходимо совместно обсуждать возникающие проблемы и трудности. Все проекты выглядят красиво лишь на бумаге. Но на деле вы постоянно сталкиваетесь с тонкостями и нюансами, когда выходите на площадку.

И для нас, и для ТЭМЗ это значимый опыт разработки и интеграции наукоемких изделий, а также опыт непосредственной работы с промышленностью. Большая удача, что они оказались здесь, логистически все проходит достаточно просто. На протяжении последнего года сотрудники нашей школы работают на производственной площадке.

— Не могу не спросить про ITER и про самый большой томограф, разработанный вашими учеными. С какими сложностями вы столкнулись? И на какой стадии находится внедрение?

— Сейчас томограф находится на стадии опытной эксплуатации. Специалисты осуществляют техническую поддержку. Возможно, нам бы удалось ввести томограф в промышленную эксплуатацию раньше — в апреле или мае. Но из-за условий пандемии множество специалистов физически не могли оказаться на площадке. Но я надеюсь, что мы проведем эту работу до августа.

Основные сложности, с которыми мы столкнулись, связаны, конечно, с размерами и структурой объекта. Необходимо учитывать множество факторов, которые вносят погрешности в результаты контроля.

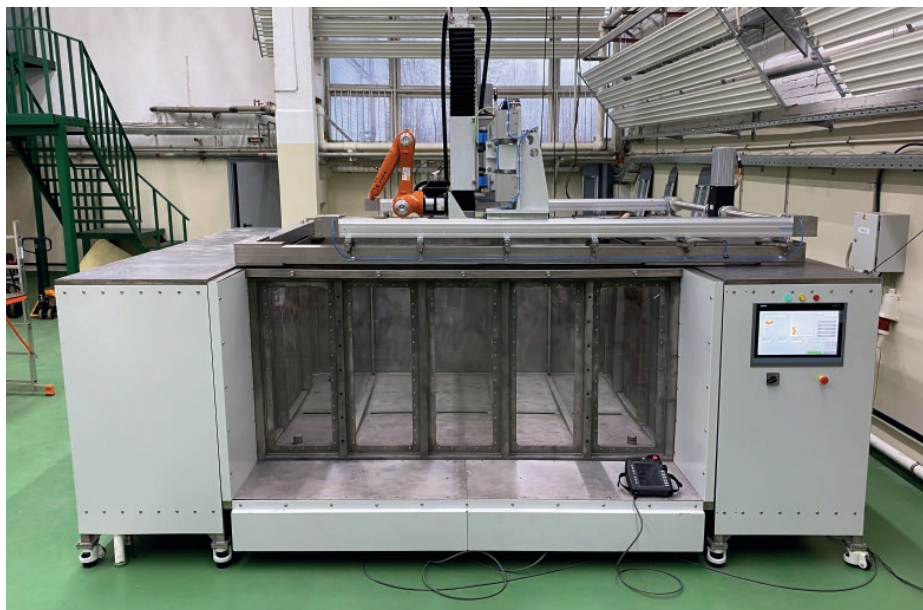
Нам как ученым очень повезло. Оказалось, что мы осуществляем контроль первой стенки, которая непосредственно контактирует с плазмой и находится внутри термоядерного реактора. Однако сложность в том, что этот барьер состоит

из множества биметаллических и мультиметаллических соединений. Это ставит перед нами крайне интересные задачи: в каждом металле свой коэффициент распространения ультразвука. При этом на границе металлов происходят отражение, рассеивание и фильтрация всех сигналов. Для нас это высший пилотаж!

К счастью, здесь нам помогают коллеги из компании «Акустические контрольные системы» и Московского энергетического института, а также коллеги из Фраунгофера. Такой большой международной командой мы решали те амбициозные задачи, которые открылись перед нами в ходе реализации проекта.

Отрадно и то, что наши результаты не остались незамеченными. Сейчас мы обсуждаем с учеными из Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН возможность создания методики и дальнейшей разработки систем контроля для их собственных габаритных комплексов. Здесь как нельзя кстати придется наш опыт работы с Томским электромеханическим заводом. Я думаю, что это будет интересный сплав, поскольку коллеги из РАН работают над глубокой экспертизой фундаментального понимания процессов с точки зрения материаловедения. Их опыт позволит нам приобрести новые знания, а наши навыки помогут им решить поставленные задачи.

Конечно, это не единственный пример эффективной работы с академией наук. Здесь нельзя не упомянуть проект по созданию медицинского бетатрона, который не был бы реализован без помощи академика РАН Е.Ц. Чойнзонова — директора НИИ онкологии ТНИМЦ РАН. У него богатый многолетний опыт эксплуатации бетатронов для интраоперационных целей. Во время операции по удалению раковой опухоли либо на нее саму,



Самый большой российский ультразвуковой дефектоскоп инженеры ТПУ создавали для контроля деталей термоядерного реактора ITER



Сердце бетатрона — вакуумная ускорительная камера из молибденового стекла

либо на ее ложе точно направляется высокая доза ионизирующего излучения, выработанного бетатроном. При этом оставшиеся после операции раковые клетки погибают. Тем самым минимизируется возможность рецидива.

Важно, чтобы такой формат сотрудничества продолжал поддерживаться, а промышленных партнеров становилось больше. Эта самая благоприятная для нас сценарий. Мы как раз выполняем некоторую интеграционную функцию — объединяем опыт, готовим кадры, знаем, как общаться с промышленностью, и используем фундаментальные знания, которые сосредоточены в академии наук. Треугольник, который выстраивается сегодня, показывает свою эффективность и способность комплексно решать новые задачи. Все чаще поступают конкретные запросы от промышленности. Однако нам уже нужно переходить от локальных исследований к комплексным научно-техническим проектам и программам, которые закроют пробелы целой отрасли. Только так мы сможем претендовать на серьезные успехи, в том числе на международной арене.

— Вы последовательно шли к большой науке. Все ли задуманное удалось реализовать? В каких направлениях вы планируете развиваться?

— Конечно, самое грандиозное еще впереди. По крайней мере, хочется в это верить. Разумеется, не все запланированное удавалось в силу разных причин, какие-то проекты или контракты, к сожалению, не состоялись. Однако это никоим образом не влияет на общую линию развития и позитивную динамику.

Оглядываясь назад, я вижу наш путь — от выполнения локальных задач до комплексных решений, над которыми мы сейчас работаем. Сегодня нам под силу сложные задачи.

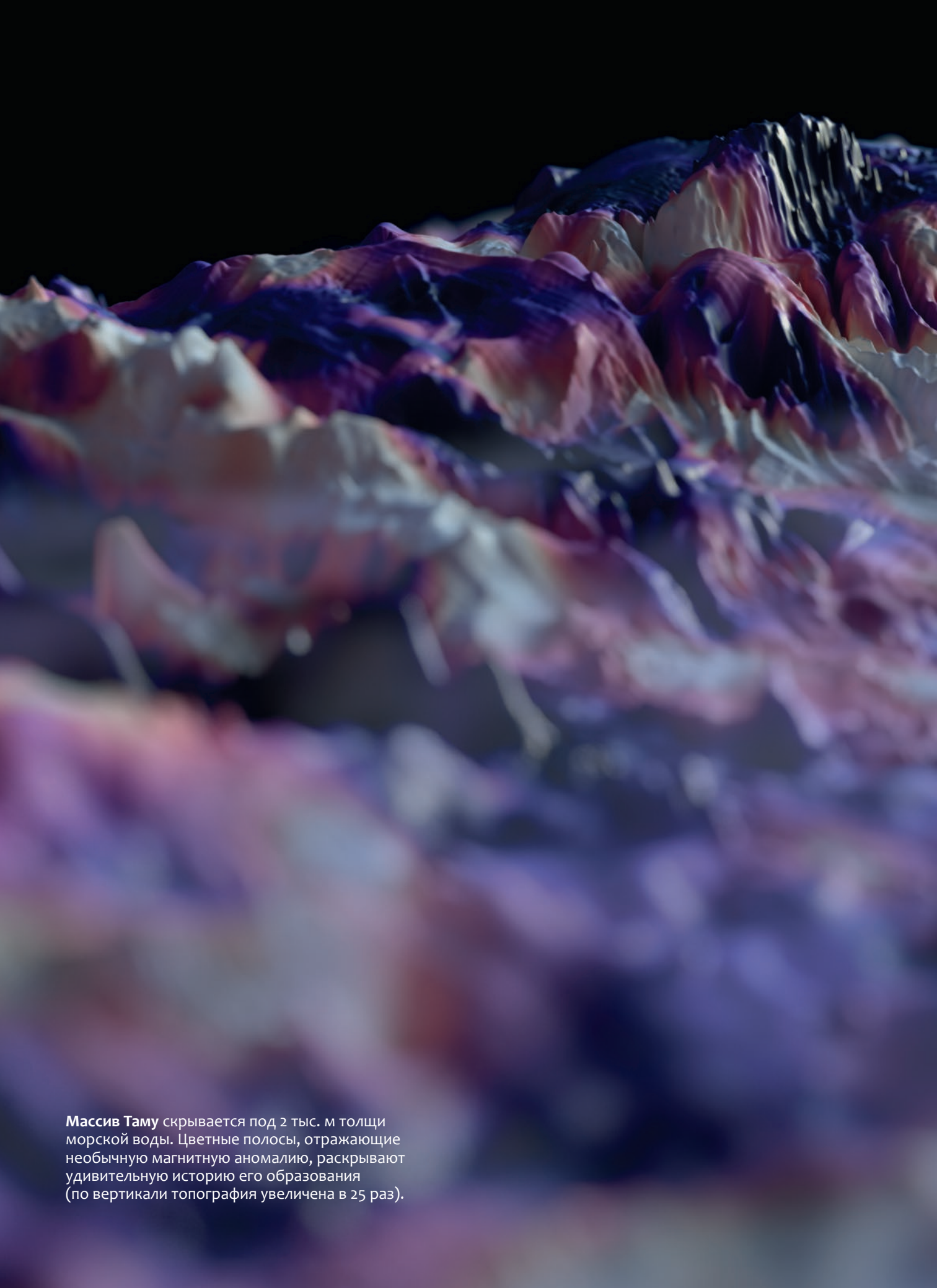
Если говорить про науку, то я мечтаю о создании целой линейки томографов, которые будут продаваться как в России, так и за рубежом. Как мне кажется, у нас для этого есть необходимые компетенции, знания и умения. Однако это вопрос дальнейшей проработки и вывода на рынок, разработки маркетингового анализа и других аспектов.

Как исследователь я планирую написать докторскую диссертацию, которая продолжит тему ультразвукового контроля и тех разработок, которые были созданы под моим руководством.

Если говорить про инженерную школу в целом, то я вижу большую интеграцию в системы непрерывного мониторинга, в системы обеспечения качества, которые станут полностью автоматизированными. Прямо сейчас мы работаем с большими данными. Поэтому в идеале необходимо создать модульную систему, которая позволит контролировать объект с помощью различных физических методов. Здесь также потребуется программный комплекс, который будет обобщать результаты аналитики и предоставлять оператору полную интегрированную картину, а также варианты решения относительно целесообразности эксплуатации конкретного объекта.

Как для руководителя школы мне важно, чтобы она продолжала развиваться. Хочется видеть больше молодых ученых, которые будут привносить что-то новое. Я планирую увеличить контингент студентов и общий состав исследователей, преподавателей. Сфера наших интересов — достаточно особая. Очень хочется эту уникальность сохранить и стать центром научного притяжения. ■

Беседовала Анастасия Пензина



Массив Таму скрывается под 2 тыс. м толщи морской воды. Цветные полосы, отражающие необычную магнитную аномалию, раскрывают удивительную историю его образования (по вертикали топография увеличена в 25 раз).



ГЕОЛОГИЯ

ТАЙНА ТАМУ

Новое объяснение образования гигантского
вулкана — массива Таму — меняет представление
о формировании морского дна

Уильям Сэгер

ОБ АВТОРЕ

Уильям Сэгер (William W. Sager) — геофизик, профессор Хьюстонского университета; участвовал в 46 океанографических экспедициях и дал вулкану его имя — массив Таму.



Наше научно-исследовательское судно раскачивалось из стороны в сторону на огромных волнах темного океана. Корабль «Фалькор», длиной 83 м и водоизмещением более 2 тыс. т, только что вырвался из шторма, пришедшего из Сибири, который все еще вздымал морские просторы. Я сидел в научной лаборатории на верхней палубе, стараясь не пролить кофе на карту океанического ложа.

Была середина октября 2015 г., и мы находились в северо-западной части Тихого океана, примерно в 1,6 тыс. км к востоку от Японии. Уже в который раз я смотрел на карту, где на дне морском почти параллельные полосы окружали массив Таму, огромный древний вулкан. Каждая полоса свидетельствовала о том, как происходило намагничивание зоны морского дна — в прямом или обратном направлении, но в целом картина не соответствовала моим представлениям об извержении Таму.

Внезапно с глухим звуком волна ударила о борт «Фалькора» — и меня осенило: вдруг стало ясно, чего мне не хватало. Более двух десятилетий я изучал этот вулкан. Я опубликовал исчерпывающие статьи, где вулкану было дано имя и объяснялось его происхождение. И все-таки мое давнее озарение было лишь частичным объяснением, остальную часть можно было считать неудачной. Мои прежние догадки и чьи-то еще идеи о том, как образовался вулкан, были неверны.

У массива Таму есть особенности. Он охватывает территорию, сходную с той, что занимает штат Нью-Мексико, — около 430 км в ширину и 600 км в длину. По объему он более чем в 50 раз превышает вулкан Мауна-Лоа на острове Гавайи, но при этом по форме он преимущественно пологий. Его широкие склоны падают приблизительно на один градус от центра к краям, тогда как уклон типичного подводного вулкана измеряется от 5° до 10°. Представьте себе футбольное поле, полностью накрытое туго натянутым серым брезентом, подпираемым в центре палкой высотой всего 60 см.

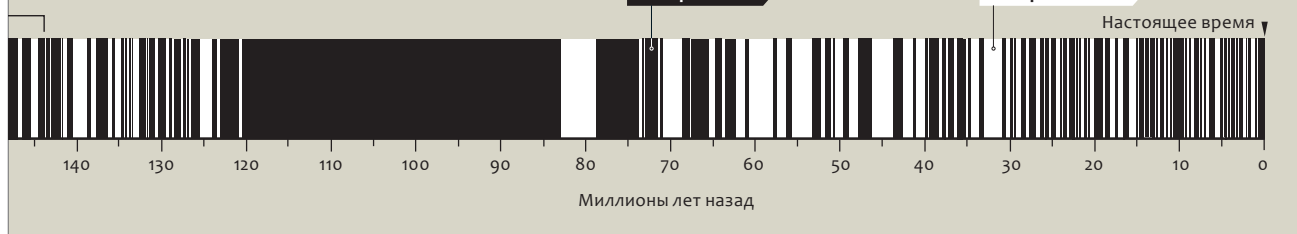
Этот вулкан — главная вершина на одном из крупнейших океанических плато нашей планеты: поднятии Шатского. При этом следует отметить, что он ниже поверхности океана примерно на 1980 м. Большинство океанических плато сложены базальтом, поскольку огромные массы магмы поднимались из мантии Земли, продавливали земную кору и, прорываясь через морское дно,

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Новые геомагнитные данные о ложе Тихого океана показывают, что огромный вулкан — массив Таму — сформировался не так, как думали специалисты.
- Массив Таму не извергался как вулкан, а был создан лавой, выдавленной между раздвигающимися тектоническими плитами.
- Вероятно, по такому же принципу сформировались десятки других вулканов на дне океана. Это новое объяснение того, как гигантские образования возникали на Земле.

Магнитный поворот

Геомагнетизм совершил решительный поворот в понимании создания массива Таму. Магнитное поле Земли меняет полярность с нерегулярными промежутками; каждое изменение оставляет полосовую аномалию на дне океана. Массив Таму начал формироваться примерно 150–144 млн лет назад, на нем самом и вокруг было зафиксировано несколько полос остаточной намагниченности.



выливались наружу. Хотя форма массива Таму, по всей вероятности, отражает такой процесс прорыва, однако данные, которые я собирал с 2015 г., показывают, что произошло нечто иное.

Новое переосмысление означает, что ученые неправильно расценили то, как десятки мощных подводных вулканов создали более 5% нынешнего океанического ложа планеты. Действительно, мы наткнулись на совершенно новый вулканический тип.

Если вулкан Таму или один из его собратьев извергнется снова, то Тихий океан может стать более кислым, убивая все виды морских обитателей. Вулкан также может выделять большое количество парниковых газов в океан и атмосферу. Если мы заглянем в историю, оказывается, что извержения аналогичного вулкана, плато Онтонг-Ява в юго-западной части Тихого океана, происходили в широко распространенных океанических условиях, характеризующихся низким содержанием кислорода. Наконец, хотя меня и вдохновляет мысль о том, что мы пересматриваем наши гипотезы образования морского дна, я также должен принять суровую правду: массив Таму, который считался «самым большим щитовым вулканом Земли», больше не заслуживает этого титула.

Кусок торта

Около 145 млн лет назад массив Таму постепенно формировался на протяжении нескольких миллионов лет. В этот период несколько раз через неравномерные интервалы изменялось магнитное поле Земли, оставляя запись в океанической коре в виде магнитных полос.

Моя первая статья о магнитной истории массива Таму была опубликована в 1993 г., во время моего пребывания в Техасском аграрно-техническом

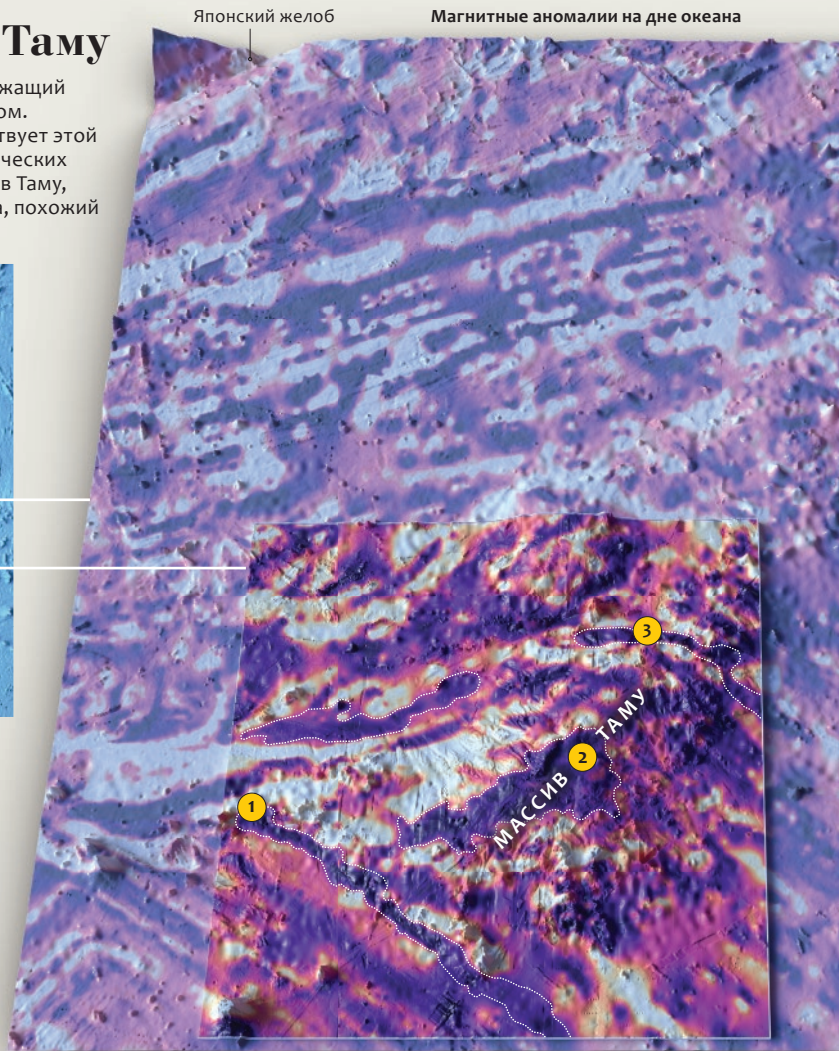
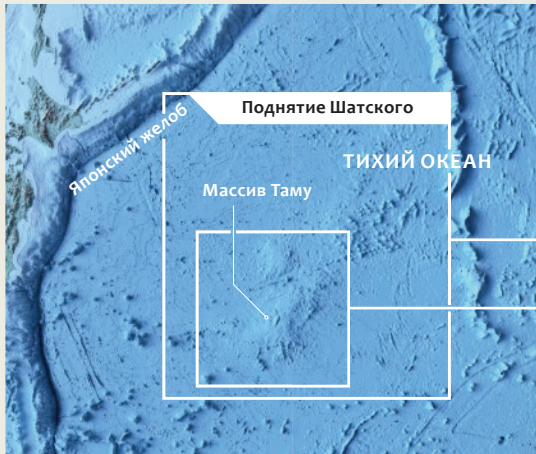
университете, в честь которого и было дано имя массиву, представляющее собой аббревиатуру названия университета (*Texas A&M University, TAMU*). Тогда я сделал вывод, что вулкан должен был сформироваться в процессе одного излияния за короткое время: огромный сгусток магмы диаметром в сотни километров двинулся вверх сквозь мантию и растекся на дне океана. Массивные извержения вытолкнули потоки горячего базальта, стекающие по склонам, где он накапливался, создавая широкий, слегка выпуклый слой новой земной коры. Последующие извержения должны были добавить больше слоев, формируя что-то вроде слоеного торта, при этом слой самого древнего базальта оставался внизу, а самый молодой лежал сверху. На суше таким образом вырастают щитовые вулканы. Эксперты придерживались аналогичных соображений относительно образования крупнейших в мире океанических плато — Онтонг-Ява и Кергеленского в южной части Индийского океана.

В 2013 г., после дальнейшего картирования массива Таму и отбора образцов базальтов во время дополнительных научных экспедиций, мы с коллегами опубликовали статью в журнале *Nature Geoscience*, указав, что массив Таму был огромным щитовым вулканом. Вскоре СМИ объявили, что мы, ученые, обнаружили «самый большой в мире щитовой вулкан».

Такая превосходная степень всегда вызывала во мне чувство досады. Я пытался донести до журналистов, что мы не обнаружили массива Таму (это произошло в начале XX в.) и что существуют более крупные океанические плато. Но что-то еще беспокоило меня: расположение магнитных полос было нетипичным для широкого щита, который образовался как слоеный торт.

Новый взгляд на массив Таму

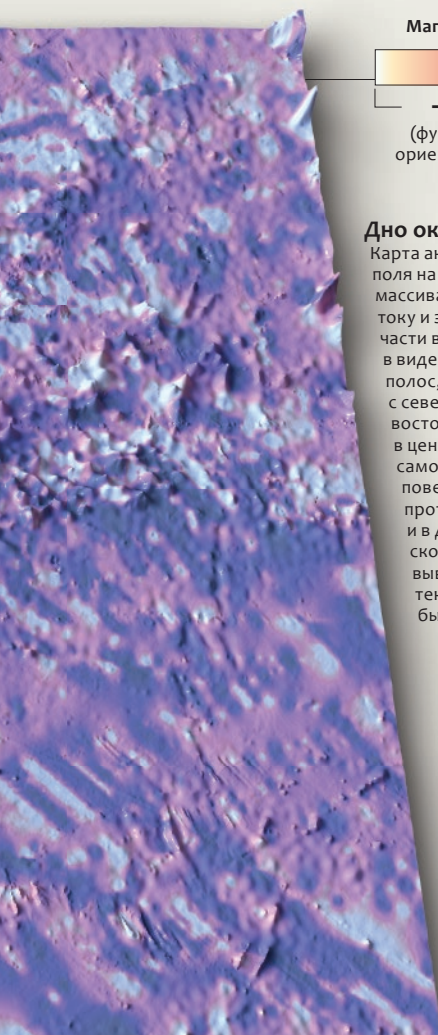
В течение многих лет ученые считали массив Таму, лежащий на дне Тихого океана, классическим щитовым вулканом. Однако рисунок магнитных полос на нем не соответствует этой точке зрения. Последние данные о движении тектонических плит, когда миллионы лет назад формировался массив Таму, показывают, что магма выстроила вулкан нового типа, похожий на большой пласт торта при разрыве на две части.



Как вулкан получил свои полосы

Около 149 млн лет назад три тектонические плиты под водами Тихого океана стали расходиться из точки тройного соприкосновения **1**, где поблизости позднее поднялся массив Таму. Расширяющаяся трещина заполнилась новым материалом земной коры. Примерно 148 млн лет назад, когда формировался массив Таму, тройное сочленение резко переместилось в северо-восточном направлении и часть хребта на границе Тихоокеанской плиты и плиты Фараллон повернулась против часовой стрелки, став частью хребта между Тихоокеанской плитой и плитой Изагаги **2**. В результате были повернуты полосы на массиве Таму. Около 144 млн лет назад, после того как вулкан прекратил изливаться, сочленение возобновило движение, так как плита Изагаги двинулась дальше **3**. Широкая полоса, прошедшая по вулкану, показывает, что основное излияние произошло во время одного периода обратной полярности.





Магнитная аномалия



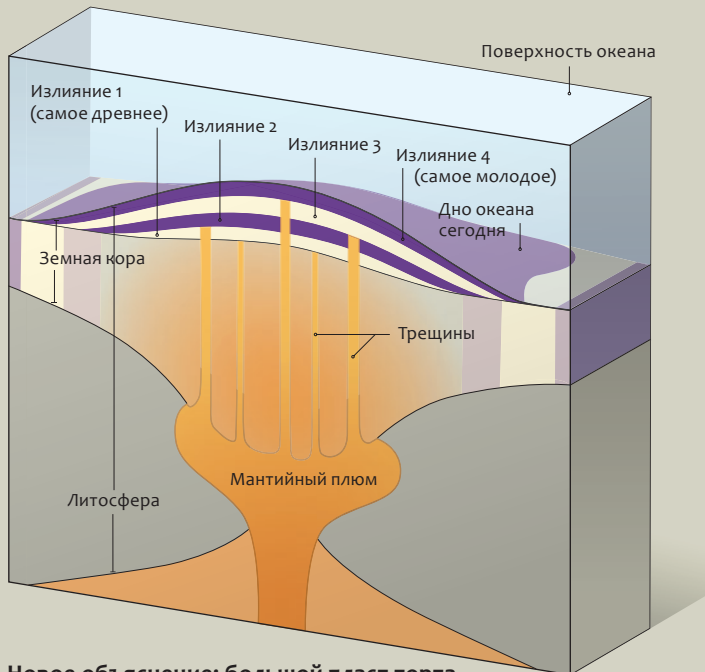
(функция изменения ориентации магнитного поля Земли)

Дно океана сегодня

Карта аномалии магнитного поля на дне океана вокруг массива Таму (врезка) к востоку и западу от нижней части вулкана показана в виде параллельных полос, простирающихся с северо-запада на юго-восток **1**. Но полосы в центральной части самого вулкана **2** повернуты почти на 90° против часовой стрелки и в два раза шире, поскольку вулкан образовывался на месте, где тектонические плиты быстро раздвигались.

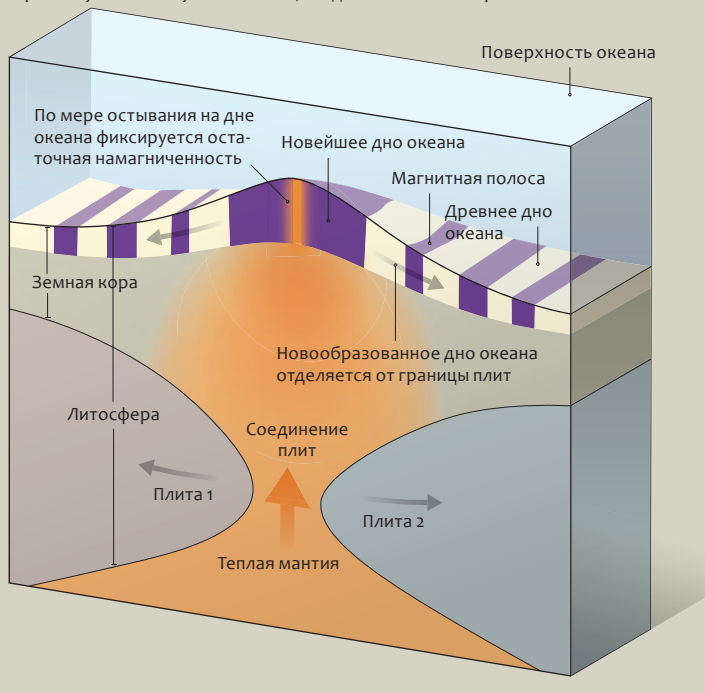
Старое объяснение: слоеный торт

Согласно первоначальному описанию массива Таму как щитового вулкана, он образовался в виде слоеного торта. Теплая мантия поднимается и расплавляется у более прохладной литосферы. Вертикальная трещина открывает горячей магне выходы из мантийного плюма сквозь океаническую кору, та изливается, растекается по дну океана и застывает в виде низкого купола. Со временем последующие излияния добавляют новые слои, надстраивая купол, как слоеный торт.



Новое объяснение: большой пласт торта

Когда тектонические плиты расходятся, они раздирают литосферу и кору, открывая вдоль границы трещину, как будто большой пласт торта надрезали посередине снизу и разделили в горизонтальном направлении. Горячая магне продавливается, заполняя пустоту, и затвердевает, образуя ложе океана. Поскольку плиты продолжают расходиться, они растягивают новое океанское дно, образуя еще одну трещину, которая заполняется свежей магмой. Этот процесс повторяется; каждый раз остывая, новая порода запечатлевает распространяющуюся магнитную аномалию, создавая полосы во времени.



Если посмотреть из космоса на ложе Тихого океана через очки, обнаруживающие магнетизм, можно было бы везде отметить параллельные полосы. Но на вулкане вы ожидаете увидеть изображение размытых потоков, потому что лава, изливающаяся из центра, нарушила бы чередование полос. Не имея чудесных очков, я собирал данные о магнитном поле в море. На «Фалькоре» я воскликнул «Эврика!» в ту самую минуту, когда выяснилось, что через массив Таму действительно проходила широкая сплошная полоса.

Массив Таму образовался в точке тройного сочленения — месте, где встречаются три тектонические плиты, как три огромных клина, сходящиеся в одной точке. Когда две плиты расходились, по их границе образовалась трещина. Магма выдавливалась, чтобы заполнить пустоту и затвердеть в виде базальта. Так как плиты раздвигались все далее от центра, новая полоса отрывалась вдоль своей оси и новая порция магмы заполняла новую пустоту.

Этот процесс повторялся снова и снова. Массив Таму вовсе не был построен как слоеный торт. Вместо этого представьте, что большой пласт торта раздирается горизонтально, а новый материал заполняет трещину, образовавшуюся внизу посередине. Впоследствии этот торт разрывался с новым заполнением новой трещины и т.д. Если чередовать шоколад и ваниль, со временем будет создан узор из полос. На массиве Таму такому образцу соответствуют полосы нормальной и обратной намагниченности.

Однако в связи с этим объяснением встают две проблемы физического характера. Полосы юго-восточной четверти массива Таму разворачиваются на 90° против часовой стрелки. В ретроспективе причина этого становится отчасти очевидной. Излияние массива Таму происходило длительное время, а кусок плиты к северо-востоку откололся и переместился, повернув сегмент около тройного соединения на 90°. В этом сегменте и образовался массив Таму. Представление о том, что полоса, прошедшая по массиву Таму, была распространяющейся магнитной аномалией, относилось к моей ошибочной догадке.

Вторая проблема состоит в том, что в модели большого пласта торта каждая вновь образованная прослойка должна иметь ту же высоту, что и существующая, уже отделенная. Но массив Таму толще всего посередине. Я думаю, что такая структура складывалась, потому что плавление в центре увеличивалось в течение некоторого времени, формируя более высокую океанскую кору.

Таму: дубль два

Мои коллеги и я собрали много данных о ложе океана и буровых проб, добытых из базальтов, которые помогают нам убедить других ученых

в правильности наших выводов. Наше новое понимание массива Таму полностью меняет представление о том, как образовались океанические плато. Изучение нескольких других океанических плато, для которых у нас достаточно данных по намагничиванию, чтобы нанести на карту полосы, дает основание полагать, что многие из них сформировались аналогичным образом. Плато, появляющиеся там, где расходились литосферные плиты, должны быть отнесены к новому классу вулканов. Это означает, что широко распространенное положение «Океанические плато — это крупные щитовые вулканы, созданные длинными лавовыми потоками базальта» неверно.

Почему мы раньше неправильно истолковывали данную картину? И имеет ли значение, что массив Таму — не классический щитовой вулкан? Мы были неправы, ибо подводные вулканы прячутся под тысячами метров воды, а мы собирали воедино картинку из фрагментарных данных. Представьте себе, что вы пытаетесь воссоздать динозавра, исходя только из его зуба и фаланги пальца стопы. Вы пытаетесь связать их в чертеже, основываясь на том, что вы знаете о других динозаврах, но если ваши предположения неверны, то картина тоже будет искаженной. Массив Таму больше не считается самым большим щитовым вулканом на Земле, потому что это вовсе не щитовой вулкан. Мы предполагали, что он сформировался как другие вулканы, но это было неправильно. Вместо этого мы учредили новый род вулканов, дали новое объяснение, как образовались гигантские формы на Земле. И их десятки на дне моря.

Ученые всегда пытаются понять, как все развивалось. Именно в этом наша задача, даже если наши собственные предыдущие выводы окажутся опровергнутыми. Наше новое понимание массива Таму позволяет мне сказать: «Мы наконец выяснили это». Возможно, это не тянет на столь же броский заголовок, как «Самый большой в мире вулкан», но точно делает меня счастливее. ■

Перевод: В.И. Сидорова

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Биндемман И. Тайная жизнь супервулканов // ВМН, № 10, 2006.
- An Immense Shield Volcano within the Shatsky Rise Oceanic Plateau, Northwest Pacific Ocean. William W. Sager et al. in Nature Geoscience, Vol. 6, pages 976–981; November 2013.
- Oceanic Plateau Formation by Seafloor Spreading Implied by Tamu Massif Magnetic Anomalies. William W. Sager et al. in Nature Geoscience, Vol. 12, pages 661–666; August 2019.



ФОТО И ВИДЕО КОНКУРС

СНИМАЙ
НАУКУ

СПЕЦПРИЗ
ЗА САМЫЕ
ЯРКИЕ РОЛИКИ,
СНЯТЫЕ ДОМА

АВТОР
САМОЙ УДАЧНОЙ
ВИДЕО РАБОТЫ
ПОЛУЧИТ ШАНС
СТАТЬ ВЕДУЩИМ
НА КАНАЛЕ

ВЫИГРЫВАЙ
ЦЕННЫЕ
ПРИЗЫ



КРИСТАЛЛЫ
(ПРЕИМУЩЕСТВЕННО САХАР)
В ВЫСОХШЕЙ КАПЛЕ
КОКА КОЛЫ
ПОД МИКРОСКОПОМ.
ПОЛЯРИЗАЦИЯ. СКРЕЩЕННЫЕ
ПОЛЯРИЗАТОРЫ.

12+

РЕКЛАМА

ПОДРОБНОСТИ НА САЙТЕ
NAUKATV.RU



ПОЗНАНИЕ



МОЯ ПЛАНЕТА



КАНАЛ
НАУКА



ЖИВАЯ ПЛАНЕТА



ПЛАНЕТА HD



ИСТОРИЯ



ДОКТОР



ТЕЛЕКАНАЛ

1997 г.: Гванженже, женщина из племени пигмеев баяка, выбирает место для своей хижины в лагере, разбитом на новом месте на севере Конго. Охотники-собиратели сезонно перемещаются по лесу, и каждая женщина переносит целое домашнее хозяйство в одной корзине.





УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

ЖИЗНЬ ВМЕСТЕ С ЛЕСОМ

Пигмеи процветали в бассейне Конго — но лишь до тех пор, пока не началось развитие региона в сочетании с охраной окружающей среды

Джером Льюис

ОБ АВТОРЕ

Джером Льюис (Jerome Lewis) — адъюнкт-профессор антропологии, директор Центра антропологии устойчивого развития и соруководитель группы *Extreme Citizen Science* («Экстремальная гражданская наука») в Университетском колледже Лондона. В 2019 г. учредил инициативу «Процветающее разнообразие» для повышения осведомленности о традиционных для коренных народов методах защиты биоразнообразия.



В непроглядной тьме мы сидим на лесной подстилке так близко, что касаемся друг друга, и поем. Каждый голос выводит с переливами особую мелодию так, чтобы все они гармонично переплетались. Время идет, отдельные мелодии сливаются, и мы начинаем растворяться в созданном нами море звуков среди людского ковра. Интенсивность пения растет, согласованность постепенно становится идеальной, а музыка так прекрасна, что ощущение собственной личности исчезает. Баяка верят, что такое великолепие привлекает к лагерю духов леса и они присоединяются к нам. Как крошечные светящиеся точки, они парят вокруг нас, приближаются и опять возвращаются в лес, едва различимо насвистывая нежные мелодии, которые изредка проскальзывают в полифонии. Ошеломленные созданной вместе красотой, некоторые баяка восклицают: *Njoor!* («Ну и ну!»), *Bisengo!* («Как здорово!») или *To bona!* («Вот так!»).



1997 г.: в лагере на новом месте Ингой кроет крышу своей хижины листьями. Племена пигмеев в бассейне реки Конго используют похожие подходы к обеспечению жизни в лесу, в том числе характерные «игры с духами» и жилища из листьев и лиан.

В такие моменты чувствуешь, будто ты и есть лес, и твоё сознание настолько расширено, что включает все вокруг: деревья, животных, людей. Подобное переживание, которое в 1990-х гг. мне довелось испытать среди пигмеев баяка в Республике Конго во время исследований для докторской диссертации, вызывает сильные эмоции и укрепляет узы любви и радости с каждым человеком и неодушевленным предметом вокруг. Во время такой «игры с духами», формы театрализованного представления с эффектом глубокого погружения, баяка чувствуют, что напрямую общаются с лесом: они общаются лесу, что внимательно заботятся о нем, еще раз подтверждая существование сокровенной

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Племена пигмеев кочевали в бассейне реки Конго более 55 тыс. лет, разрабатывая сложные природоохранные и культурные стратегии для обеспечения процветания в лесу.
- Устойчивое развитие — в форме предприятий добывающей отрасли, расположенных вдоль охраняемых зон, — привело к появлению сети дорог и создало возможности для браконьерства.
- Когда дикая природа начала приходить в упадок, защитники природы обратились к услугам «экоохраны» для сдерживания браконьеров. Но некоторые «экостражи» начали преследовать пигмеев, из-за чего многие из них стали голодать и впадать в депрессию.



Развитие в Конго

С 1990-х гг. международные институты, агентства по охране окружающей среды и местные правительства разделили бассейн реки Конго на участки для лесозаготовок и другой деятельности, оставляя заповедные зоны для дикой природы. Пигмеям разрешено охотиться на некоторых участках для обеспечения пропитания, но на практике многие из них слишком напуганы нападениями экостражей, чтобы идти в лес. Не имея возможности вести свой обычный образ жизни, многие пигмеи бродят рядом с городами лесозаготовителей, такими как Покола, в надежде найти временную работу.

Участок
в увеличенном
масштабе



связи на основе взаимной поддержки и любви. Как сказал мой друг Эмека, «баяка любит лес так же, как свое собственное тело».

Баяка следуют строгим правилам, занимаясь охотой и собирательством. Они собирают клубни дикого ямса так, что растения восстанавливаются и размножаются; они стараются не убивать беременных самок животных и потребляют все, что соберут в окрестностях. На протяжении тысячелетий в результате действий баяка и других племен пигмеев в бассейне реки Конго продуктивность леса увеличивалась не только для людей, но и для всех существ. В языке баяка нет слова, обозначающего голод. Когда однажды вечером я попытался объяснить Эмеке и его соплеменникам, собравшимся вокруг костра, что есть места, где люди погибают от голода, мой рассказ встретили с недоверием и скептицизмом.

Тем не менее в те же 1990-е гг. международные институты, такие как Всемирный банк, совместно с национальными правительствами и агентствами по охране окружающей среды начали внедрять модели устойчивого развития в бассейне реки Конго. Они провели зонирование тропического леса, выделив обширные участки для лесозаготовок

и других видов деятельности, оставив в стороне «охраняемые территории» в качестве безопасных убежищ для дикой флоры и фауны. В соответствии с представлением о том, что природа процветает, если оставить ее нетронутой (этот принцип исторически связан с политикой, проводившейся в США в XIX в.), региональные правительства запретили группам пигмеев доступ к природным заповедникам.

С тех пор я наблюдаю, как богатые леса, изобилующие слонами, гориллами, шимпанзе, нечеловекообразными обезьянами, кабаном и антилопами, превращаются в деградированные лесные массивы, пока национальные и международные рынки извлекают пользу из лесной продукции. Популяция слонов в Центральной Африке за период с 2002 по 2011 г. сократилась более чем на 60% и продолжает уменьшаться. Прежде активные, хорошо питавшиеся и жизнерадостные, баяка в наши дни — это зачастую недоедающие, страдающие от депрессии и алкоголизма временные рабочие. Сегодня представители племени живут на границе своих прежних земель, часто становятся объектом эксплуатации, в том числе сексуальной, со стороны чужаков, и их терроризируют



1997 г.: дети баяка радуются, качаясь на качелях, сделанных из лиан. Всеми игрушками детей обеспечивает лес.

так называемые экостражи. Пигмеи баяка процветали в бассейне Конго десятки тысяч лет, и всего лишь за несколько десятилетий они стали жертвой ненасытного аппетита индустриальной цивилизации к природным ресурсам и колониального подхода к их охране — за счет изгнания аборигенов с их родины.

В отличие от подхода к охране природы по принципу «сверху вниз», который зачастую связан с добывающей промышленностью и постоянно не отвечает заявленным целям, защита лесов и дикой природы, организованная по принципу «снизу вверх», неизменно оправдывает себя. Согласно докладу Межправительственной научно-

политической платформы ООН по биоразнообразию и экосистемным услугам за 2019 г., коренные народы практически лучше всех поддерживают биоразнообразие на своей земле. Более того, 80% оставшегося на суше биоразнообразия приходится на 65% земной поверхности, которая находится под управлением, в той или иной форме, местных общин или коренных народов. Осознавая эту реальность, в рамках новой парадигмы охраны природы стараются поддерживать местные общины, чтобы те могли противостоять коммерческим силам, оккупировавшим их территории.

Сами баяка помогли мне в одном из таких начинаний. Программа «Экстремальная гражданская

наука» (*Extreme Citizen Science, ExCiteS*) позволяет местным жителям наносить на карту свои ресурсы и существующие для них угрозы и делиться своими экологическими знаниями с другими людьми. Средства и методики, разработанные нами в бассейне реки Конго, оказались полезными в разных частях мира. Сеть общин в заповеднике Прей Ланг в Камбодже настолько успешно использовала для защиты леса последнюю версию нашей программы составления карт, *Sapelli app*, что получила престижную премию Экваториальной инициативы ООН в 2015 г., премию за инновации Йельского отделения Международного общества лесоводов тропической зоны в 2017 г. и премию «Обеспеченная энергией планета» в 2019 г.

Идеальный мужчина баяка

Когда в 1994 г. мы с моей женой Ингрид и трехлетним сыном Нандо нерешительно выбрались из долбленной лодки на песчаный берег реки Санга на северо-западе Конго, именно Эмека приветствовал нас теплой улыбкой. Эмека, харизматичный мужчина за 30, был одним из группы, состоящей примерно из 40 пигмеев, разбившей там лагерь. Занимающиеся охотой и собирательством племени пигмеев, которые живут в бассейне реки Конго (от Уганды, Руанды и Бурунди на востоке до Атлантического океана на западе), говорят на разных языках, а их численность по разным оценкам составляет от 300 тыс. до 1 млн человек. Представители всех групп считают себя исконными жителями леса; ДНК-анализ показывает, что их предки жили в этом регионе по меньшей мере 55 тыс. лет.

Несмотря на внешние различия, эти группы пигмеев, по-прежнему живущие в нетронутых лесах, используют сходный подход для обеспечения успешного проживания в окружающей среде: хижины в форме иглу из листьев и лиан, орудия для охоты и сбора меда, характерный стиль пения для общения с лесными духами. В течение следующих трех лет, пока я, Ингрид и Нандо прошли тысячи километров, путешествуя через лес с Эмекой, его женой Мамбулой и многочисленными членами его расширенной семьи, мы полностью приняли их энергичный эгалитарный образ жизни. Наши компаньоны учили нас, как быть успешными охотниками-собирателями: как двигаться и переходить вброд огромные болота, как ориентироваться по слоновьим тропам, как охотиться на диких животных, собирать фрукты, клубни диких растений, съедобные листья и сезонных насекомых, как устраивать запруды в лесных ручьях, чтобы поймать рыбу, и как играть с лесными духами.

Эмека был нашим гидом. Как выяснилось, он — сильный и смелый охотник, заботливый, усердный и снисходительный отец и муж, спокойный посредник и мудрый советчик, искусный оратор,

певец, рассказчик и постановщик импровизированных театральных представлений в лагере, и он невероятно щедр. Экономика баяка основана на следующем принципе: если ты видишь у кого-то что-то, что тебе нужно, — просто попроси. Жизнь в обществе с экономикой, организованной по принципу «распределение по потребностям» (как называют его антропологи), похожа на жизнь в месте, где товары бесплатны. Даже если человек редко вносит свой вклад — скажем, потому что это ребенок или старик, или человек ментально или физически нездоров, — никто никогда не ставит под вопрос его право требовать долю, что бы ни принесли в лагерь. Эмека постоянно отдавал все, что у него было.

Баяка решительно отвергают идею о том, что миром природы может кто-то владеть. «*Komba* (творец) создал лес общим для всех существ», — рассказывал мне Эмека. Как-то раз, во время похода на ночную охоту, мы с Эмекой разбили лагерь рядом с группой горилл. Доминантный самец учуял запах от нашего костра и начал реветь, чтобы нас напугать. Эмека был взбешен. Он ругался и кричал на самца гориллы за то, что тот думает, будто лес принадлежит ему: лес существует, чтобы удовлетворять нужды всех созданий. В другой раз мой друг Туба указал на своего маленького сына: «Смотри, он ест продукты леса — и лес делает его тело сильным». В сущности, баяка рассматривают себя как лес, превратившийся в людей, поэтому они не представляют, как можно продать участок леса, так же как я не могу вообразить, что можно продать свой большой палец или ступню.

В том же духе баяка считают, что лес богат ресурсами до тех пор, пока каждый уважает определенные принципы. Недостаток или нужда возникают из-за людей, которые не делятся надлежащим образом, и возникающей из-за этого социальной дисгармонии, а не потому, что природа не вполне способна обеспечивать потребности. Ряд правил, называемых *ekila*, гарантируют изобилие. Например, если участок леса становится непродуктивным, баяка закрывают к нему доступ, так что никто не может там охотиться или заниматься собирательством; запрет снимают, когда зона восстановится. После охоты каждый человек в лагере должен получить порцию мяса и обязан с уважением обращаться с тушей животного. Лес заботится о своих обитателях и желает слышать от них восхитительные звуки; разделяя с лесом песни и смех, можно убедить его быть необычайно щедрым. Таким образом, основные социальные институты баяка устроены таким образом, что не только обеспечивается изобилие, но также ценятся и поддерживаются радость и веселье.

Время, которое мы провели в 1990-х гг. в странствованиях по лесу, было идиллическим. Мы питались дарами природы и перемещались свободно

и без страха. Мы танцевали и играли в игры с духами целыми днями, иногда неделями. «Они были людьми, которые нашли в лесу нечто, превратившее их жизнь во что-то большее, чем простое существование, нечто, сделавшее жизнь — со всеми ее трудностями, проблемами и трагедиями — прекрасной, наполненной счастьем и свободной от забот», — написал почти три десятилетия назад антрополог Колин Тернбулл (Colin Turnbull) о пигмеях мбути (бамбути), живущих на северо-востоке Конго почти в 1 тыс. км отсюда. Почти так же я думаю о баяка.

Но надвигалась беда. В 1993 г. Общество охраны дикой природы вместе с Всемирным банком работали над учреждением национального парка Нуабала-Ндоки в Республике Конго. Нацпарк, расположенный на площади 4 тыс. км² на границе с Центрально-Африканской Республикой (ЦАР), предназначался для защиты слонов, антилоп бонго, шимпанзе и горилл. Поскольку пигмеи едва оставляли следы своего присутствия, власти и ученые из Общества охраны дикой природы заявили, что район необитаем. Когда лесные патрули встречали охотников-собирателей в заповеднике, то изгоняли их. Как следствие, кланы баяка из Конго оказались разлучены со своими родственниками в ЦАР и утратили доступ к большому участку леса, который был им хорошо знаком на протяжении поколений.

Границы национального парка установили в 150 км к северу от того района, где я странствовал с группой Эмеки, поэтому мы не ощутили влияние сразу. Но мы находились в широкой «буферной зоне», включавшей обширные участки, переданные для лесозаготовок в рамках концессий, вокруг охраняемой территории. Так начался закат изобильного и процветающего региона, где благоденствовали разные биологические виды.

Сапеле

Я помню, как мы в первый раз наткнулись на лесовозную дорогу в 1994 г. Мои компаньоны баяка жаловались, что поверхность под ногами очень твердая, насколько жарко без тени деревьев и как много назойливых насекомых. Мы с Эмекой рассмеялись, когда женщины врассыпную бросились в чащу леса, как будто за ними гнался бык, когда по дороге проехал первый лесовоз. Со временем дороги стали пересекать лес крест-накрест, что способствовало добыче мяса диких животных, пищевых растений и другой продукции леса для обеспечения городских рынков.

Особый интерес для лесозаготовительных компаний представляла великолепная сапеле (*Entandrophragma cylindricum*). Эта водостойкая, невероятно прочная, устойчивая к насекомым и обладающая прекрасными переливающимися волнами древесины пользуется большим спросом



на международных рынках. Однако сапеле играет важную роль при том образе жизни, который ведут пигмеи. Как-то раз после 60-километрового перехода я пожаловался на стертые ноги. Эмека срезал с сапеле ромбовидный пласт коры: слой непосредственно под твердой корой обладает сильными анальгезирующими и антибактериальными свойствами. Эмека поместил пласт вверх изнанкой над костром, чтобы нагреть масла в обладающем лечебными свойствами слое, затем положил кору на землю и сказал мне поставить на нее ноги. Блаженное облегчение наступило мгновенно. Я часто видел, как страдающие от малярии дети баяка вдыхали пар над горячей водой с настоящей корой сапеле для облегчения приступа лихорадки.

Еще более важно, что кроны самых высоких деревьев сапеле выступают над пологом леса и перед



Декабрь 2019 г.: Нгеше и Нгвенье, старейшины баяка, носят на лбу отметки из белой глины в знак скорби по недавно умершей сестре (1). Не имея возможности вести свой привычный образ жизни в лесу, они живут в основном поблизости от Индонго, бывшего лагеря лесорубов. Кейо (справа) и ее подруга сидят неподалеку на брошенной лесохозяйственной технике (2). На священной поляне поблизости Эмека, которому сейчас около 60, объясняет, как баяка заботятся о лесе (3).

наступлением сезона дождей привлекают полчища бабочек *Imbrasia oyemensis* (из семейства павлиноглазок), которые откладывают яйца на листьях. После вылупления гусеницы быстро растут и становятся крупными, невероятно вкусными и очень питательными. Гусениц так много, что они толстым ковром покрывают землю под этими деревьями. Пигмеи высоко ценят гусениц не только за их вкус, важно также время их появления: из-за дождей животные покидают места водопоя, поэтому результаты охоты непредсказуемы. «*Komba* посылает гусениц, чтобы накормить людей, когда охотиться тяжело», — рассказывал мне Эмека, пока мы сидели, поджаривая гусениц на шампурах над тлеющими угольками, и наслаждались свежим вкусом мяса.

Баяка были очень расстроены, когда лесозаготовители срубили «гусеничные деревья», которые пигмеи эксплуатировали на протяжении поколений, но они считали, что не могут этому препятствовать или противиться, поскольку идея о совместном использовании составляет основу их нравственных принципов. «В лесу достаточно деревьев для всех; мы можем поделиться некоторыми из них», — говорили некоторые баяка в самом начале.

Я со своей семьей уехал из Конго в 1997 г., когда началась гражданская война, но продолжал регулярно посещать регион с исследовательскими целями. По окончании конфликта, в 2000 г., испытывающее финансовые трудности правительство открыло лесозаготовителям доступ ко всему оставшемуся лесу. Те построили множество

дорог, углубляясь во все более удаленные районы. К 2003 г. производство лесоматериалов увеличилось более чем в два раза по сравнению с уровнем 1990-х гг., до 1,3 млн м³, и продолжало расти.

Заметив эту тенденцию, экологи стали оказывать давление на лесозаготовительные компании, действующие в бассейне реки Конго, чтобы те следовали принципам Лесного попечительского совета (*Forest Stewardship Council, FSC*). Согласно этим стандартам, компании обязаны соблюдать национальные законы, минимизировать воздействие на окружающую среду, держаться в стороне от зон, имеющих высокую природоохранную ценность (таких, как участки, более населенные шимпанзе), и уважать права работников и живущих в лесу коренных народов. Мультинациональная компания *Congolaise Industrielle des Bois (CIB)*, которая осуществляла эксплуатацию 1,3 млн га принадлежащего баяка леса со своей базы в Поколе, городе лесозаготовителей на реке Санга, решила попытаться получить сертификат *FSC*.

По моему мнению, компания, вероятно, в любом случае продолжила бы заниматься валкой деревьев, с сертификатом *FSC*, предоставляющим редкую и ценную возможность защитить права и ресурсы пигмеев, или без него. Раньше я занимался исследованиями, посвященными тому, как реализовать принцип «свободного, предварительного и осознанного согласия», когда уязвимые группы населения сталкиваются с перспективой реализации проектов развития на их территории. Поэтому я стал платным консультантом Фонда тропических лесов (в настоящее время он называется

Earthworm), неправительственной организации, которую *CIB* наняла для оказания помощи при рассмотрении социальных вопросов, связанных с сертификацией *FSC*. Фонд поручил мне разработку системы, с помощью которой пигмеи, населяющие участки, переданные *CIB* по концессионным соглашениям, могли определить, стоит ли разрешить лесозаготовки на их территориях.

Когда я обсудил социальную и экономическую значимость сапеле с менеджерами *CIB*, они высказали опасение насчет возможного конфликта с 10 тыс. баяка, живущими на участках, предоставленных компании по концессии. Затем последовали напряженные совещания с участием представителей лесозаготовительной компании и баяка, где я выступал посредником, но культурный барьер оказался непреодолимым. Охотники-собиратели чувствовали себя крайне некомфортно в офисных зданиях: их пугали даже кажущиеся простыми задачи, например открывание дверей, не говоря уже о более специфических, таких как понимание повестки дня или заполнение бланков. Тем не менее в своих лагерях Эмека и другие объясняли, что надежно обеспечивать гусеницами будут только те деревья сапеле, чьи кроны возвышаются над пологом леса. Баяка попросили лесозаготовителей защитить такие деревья, а также естественные родники, могилы предков, священные рощи, лекарственные деревья и некоторые другие значимые ресурсы.

Я предложил руководителям *CIB* оказать поддержку пигмеям баяка в нанесении на карту таких мест, и, к моему огромному облегчению, они согласились. Ингрид, работавшая в сфере здравоохранения, разработала ряд символов для того, чтобы помочь целителям баяка читать этикетки на лекарствах из передвижной аптеки, которую Ингрид вместе с пигмеями организовали для лечения от глистов, малярии и других болезней. Это подсказало мне идею. Совместно с баяка и частной компанией-разработчиком программного обеспечения, которая занималась созданием средств для отслеживания цепочек поставок редких материалов (в данном случае твердой древесины), мы придумали интерфейс с картинками для сенсорного экрана карманного компьютера, оснащенного *GPS*. Одному из баяка нужно было просто пойти к ресурсу, который племя хотело сохранить (скажем, к выступающему над пологом леса дереву сапеле), и нажать символ «гусеница», чтобы обозначить его местоположение.

Маркировка помогла преодолеть языковой и культурный барьеры. Когда лесозаготовители наложили картографический слой, созданный баяка, на карту с сапеле, намеченными к вырубке, то обнаружили, что все еще можно вырубить достаточное количество деревьев для получения прибыли. Вместе с охотниками-собирателями



2019 г.: распиленные лесоматериалы и бревна, предназначенные для сплава вниз по реке Сангу, уложены штабелями (1) около Поколы, городка лесозаготовителей. В другом месте нагруженный лесоматериалами грузовик (2) ожидает паром, чтобы переправиться через Сангу. Твердая древесина из лесов Конго экспортируется по всему миру.

и менеджерами компании я разработал ряд процедур (например, привлечение целых семей к картированию, поскольку женщины и мужчины племени баяка ценят разные ресурсы) для того, чтобы определить условия, при которых разные группы баяка могли бы разрешить лесорубам доступ в свой лес. В 2006 г. *CIB* стала первой лесозаготовительной компанией, получившей долгосрочный сертификат *FSC* в бассейне реки Конго, а позже и другие компании в этом большом регионе использовали данную модель в качестве основы для разработки мер по защите прав пигмеев, чтобы гарантировать получение *FSC*-сертификата.

Лесорубы, браконьеры, защитники природы

Шли годы, и я наблюдал, как эти меры переставали действовать. Перегруженные работой сотрудники компании начали медленный, но неумолимый процесс разрушения процедур: они стали пренебрегать обременительными обязательствами (например, начали брать в походы для нанесения ресурсов на карту только мужчин баяка) и игнорировать технические проблемы с приборами. Тем не менее обозначенные пигмеями ресурсы в основном охраняли. И все же если бы охотники-собиратели или я как посредник в их переговорах с внешним миром предвидели важный побочный эффект лесозаготовок, то баяка, возможно, не дали бы свое согласие.

Раньше когда кто-нибудь собирался идти в лес, ему требовался проводник-пигмей, и если охотники-собиратели не одобряли чужаков, то не брали их с собой. Однако сеть лесовозных дорог предоставила браконьерам, ведущим промысел



в промышленных масштабах (то есть тем, кто охотится не для собственных нужд, а для ненасытных местных и международных рынков), доступ к нетронутым участкам, и пигмеи не могли контролировать таких чужаков. Браконьеры использовали новые дороги для масштабных лесных рейдов за мясом для обеспечения потребителей в городах. Торговля мясом диких животных оказалась настолько прибыльной, что были созданы целые хорошо организованные сети браконьеров, зачастую поддерживаемые элитными покровителями, такими как крупные армейские и полицейские чины. Кроме того, быстро возникающие в лесной чаще лагеря лесозаготовителей привлекали банту, проживавших в деревнях по окраинам леса и обеспечивавших лесорубов продуктами и другими услугами. Такие стихийно возникшие поселения росли, и в каждом уже насчитывались сотни жителей, многие из которых тоже начали охотиться на диких животных.

Расстроенные защитники природы из Общества охраны дикой природы, Всемирного фонда дикой природы (WWF) и других организаций наняли группы экостражей для предотвращения преступлений против дикой природы, неосторожно создавая военизированные формирования, которые не могли контролировать. Многие стражи начали извлекать выгоду за счет леса, иногда действуя

совместно с группами браконьеров, а также избивать и истязать пигмеев, если обнаруживали их с мясом диких животных, даже добытым на легально разрешенной охоте. После того как правозащитные организации в 2000-х гг. опубликовали данные о таких злоупотреблениях, природоохранные организации формально дистанцировались от экостражей, поощряя местные правительства включать их в соответствующие министерства, занимающиеся лесным хозяйством. Защитники природы продолжали оказывать экостражам финансовую и логистическую поддержку, но уже не могли призвать их к дисциплине или уволить, то есть контроль уменьшился.

Приблизительно в 2010 г. агентства по охране природы начали сотрудничать с лесозаготовительными компаниями для предотвращения браконьерства на переданных в концессии участках, граничащих с заповедными зонами. Лесозаготовители проводили проверки экостражей на предмет количества арестов и объемов конфискации контрабанды (такой, как мясо диких животных). Экостражи, неспособные противодействовать могущественным преступникам в сфере незаконной торговли ресурсами дикой природы, энергично принялись за более легкие цели: охотников-собираателей и жителей деревень. Несмотря на то

что коренным народам для обеспечения пропитания официально разрешалось охотиться на определенные виды животных с использованием традиционных методов, на практике оказалось, что экостражи стали рассматривать наличие любого вида мяса как доказательство браконьерства, чтобы оправдать запугивание, истязание и побои.

Еще больше ухудшил ситуацию тот факт, что с 2007 г. вместо осуществления добычи полезных ископаемых и реализации других прав Китай строит в Конго дороги и другую инфраструктуру. Для строительства дорог приехали сотни китайских рабочих, и такой наплыв совпал со значительным ростом масштабов браконьерской охоты на слонов. Дороги, проложенные лесозаготовителями, связали с автострадами, построенными китайскими подрядчиками, обеспечив таким образом эффективную транспортную сеть для перевозки слоновой кости и мяса диких животных.

Защитники дикой природы ответили на увеличение масштабов браконьерства, удвоив ставку на «охрану крепости», как описывают такую позицию специальный докладчик ООН по правам коренных народов Виктория Таули-Корпус (Victoria Tauli-Corpus) и другие наблюдатели. Общество охраны природы, WWF и другие природоохранные организации расширили существующие национальные парки, объединив их в трансграничные заповедные территории, такие как расположенная на площади 750 тыс. га заповедная зона Санга, включающая три нацпарка, в том числе Нуабала-Ндоки. Природоохранные организации, зачастую сотрудничавшие с предприятиями добывающей промышленности и агентствами по развитию, продолжали разрабатывать проекты новых охраняемых природных территорий, не получив согласие коренного народа. В марте этого года исследователи из Программы развития ООН сообщили, что пигмеи баяка с северо-запада Конго заявляют «о неизбирательном насилии, унижении и запугивании» со стороны контролируемых WWF экостражей, которые выселяют их с территории, расположенной в границах планируемого национального парка Мессок Джа. «В результате традиционные способы охоты баяка начинают считать уголовным преступлением», — указали исследователи.

Страх, голод и алкоголь

С тех пор как почти весь лес поделен на природные парки и участки лесозаготовителей, где пигмеев преследуют за занятия охотой и собирательством, баяка больше не могут благоденствовать и поддерживать свою связанную с лесом идентичность. «О, это было здорово, так здорово! Мед для всех! Дикий ямс... больше, чем можно унести! — рассказывал в 2013 г. старший брат Эмеки, инвалид Монгемба. — Теперь все кончено, все кончено! Теперь только печаль! Мы так голодаем. Страх,

столько страха! Мальчики боятся идти в лес». Маинджа, 45-летняя женщина, имеющая внуков, объяснила: «Если мы идем в лес, нас забирают экостражи. Вот почему мы больше не приходим в лес. Теперь мы просто остаемся в деревнях, а не в лагере в лесу. Так мудрый уклад предков исчезает».

Теперь пигмеи боятся разбивать лагерь в лесу, как раньше, а экономическая необходимость вынуждает, и многие баяка скитаются около лагерей лесорубов или сельскохозяйственных деревень в поисках работы в качестве сельскохозяйственных рабочих, поденщиков и помощников по дому. Большинство мужчин баяка слишком напуганы, чтобы идти на охоту. Поскольку культурная и социальная значимость мужчин баяка исторически зависела от их способности добывать мясо для того, чтобы прокормить семьи, а теперь они больше не могут этим заниматься, их самооценка резко упала. В связи с тем, что теперь баяка работают простыми рабочими, которым зачастую платят лишь незаконным алкоголем, полученным перегонкой, многие мужчины превратились в алкоголиков со всеми психологическими, социальными и экономическими проблемами, которые влечет за собой такая зависимость. Многие женщины баяка страдают от домашнего насилия, а те, кто живет вокруг палаточных лагерей лесорубов, часто становятся объектом сексуальной эксплуатации со стороны чужаков.

С точки зрения пигмеев, их лес — растения и животные — превратили в имуществу, которым завладели чужаки, чтобы загадочным образом получать прибыль. Баяка совершенно непонятна логика устойчивого развития: удовлетворение потребности в ресурсах за счет открытия доступа в лес для добывающей промышленности с одновременной компенсацией ущерба с помощью создания милитаризованных заповедных зон. Лесозаготовители обосновывают продолжение вырубки тем, что это форма развития, тем не менее прибыль редко доходит до коренного народа, живущего в лесу. Защитники природы указывают на вред, нанесенный находящимся под угрозой исчезновения видам в ходе лесозаготовок, строительства дорог и давления рынков, чтобы оправдать драконовские ограничения охоты для охотников-собирателей и насилие со стороны экостражей. Но горький опыт обитателей леса одинаков для пигмеев, слонов, леопардов, горилл и шимпанзе: причина, по которой их теперь так мало, заключается именно в присутствии чужаков.

Защитники природы правы. Фиона Майселс (Fiona Maisels) из шотландского Университета Стирлинга и ее коллеги подсчитали в 2013 г., что популяция слонов в бассейне реки Конго уменьшилась и сейчас их численность составляет чуть больше трети от зафиксированной в начале тысячелетия. Численность западных береговых горилл (*Gorilla gorilla gorilla*) тоже резко сократилась.

Согласно отчетам Службы рыбного и охотничьего хозяйства США, в лесах бассейна Конго ежегодно добывается почти 5 млн т диких животных, что приводит к локальному исчезновению видов. По данным Программы ООН по окружающей среде, во многих национальных парках Демократической Республики Конго (границающей с Республикой Конго) к 2010 г. исчезло 80% крупных млекопитающих.

Причина разобщенности охотников-собирателей и защитников природы, несомненно, заключается в противоположных взглядах на жизнь. Для баяка изобилие — естественное состояние вещей, которое гарантировано за счет справедливого распределения между всеми присутствующими. Лес — это разумное существо, с которым они поддерживают социальные взаимоотношения, основанные на взаимных уважении и поддержке, за счет табу, ритуалов, песен и танцев. Изобилие животных, наблюдавшееся в этом регионе до недавнего времени, свидетельствует об успехе такого подхода к управлению лесным хозяйством в долгосрочной перспективе. Защитники природы и эксперты по устойчивому развитию, наоборот, представляют глобальную экономическую систему, которая овеществляет природу, способствует ее превращению в имущество и позволяет элитам доминировать при принятии решений о распределении ресурсов, что, в свою очередь, приводит к уменьшению численности биологических видов.

Новая парадигма

Тем не менее во всем мире начинает использоваться новый подход к охране окружающей среды. Исследователи, активисты и основная часть общества осознают, что общины коренных народов — главные защитники природы, и стараются им помочь. Хотя модель картирования ресурсов, которую мне помогли разработать Эмека и другие, в конечном итоге не спасла жизненный уклад пигмеев, она оказалась более успешной в других местах, где было меньше институциональных и технологических проблем: например, там, где ниже уровень коррупции, больше развита демократия и сильное правительство или где лучше доступ к сети для мобильных телефонов.

Мой опыт в создании реки Конго в конце концов привел к созданию исследовательской группы *ExCiteS* в Университетском колледже Лондона. С тех пор мы разработали *Sapelli*, модифицируемое приложение для смартфона, для сбора информации о жизненно важных ресурсах, деятельности браконьеров и других данных; *Geoku*, систему для хранения данных; *Community Maps*, приложение для просмотра данных с сопутствующей информацией; и методологию совместной разработки проектов с участием коренных народов и других сообществ, исходя из обозначенных ими проблем

и нужд. Эти средства помогают местному населению управлять ресурсами за счет сбора данных, мониторинга изменений и проблем, определения способов реагирования на них и объединения с представителями внешнего мира для достижения своих целей.

С помощью перечисленных средств в Намибии племена народа сан, говорящие на диалекте жуцзоан, фиксируют, как их соседи, не принадлежащие к сан, незаконно пригоняют стада домашнего скота к водопою на их территории. К этому водопою приходят дикие животные, на которых сан охотятся, а также ведут учет их популяций. Масаи из заповедника Масаи-Мара в Кении обеспокоены снижением численности используемых ими диких лекарственных растений. Пытаясь понять, что наносит вред, они зарегистрировали 123 вида лекарственных растений, 52% которых были здоровы и не повреждены. Оказалось, что остальные виды в основном страдают от растущего числа туристических лагерей. В настоящее время масаи расширяют масштабы проекта, включив в него территорию лесного комплекса *May*. Лучший пример — совместная работа группы из Копенгагенского университета с общиной из Прей Ланг в Камбодже по прекращению незаконных лесозаготовок. Поддерживая связь по мобильному телефону, волонтеры отслеживали лесорубов, занимающихся незаконной лесозаготовкой, неожиданно вместе нападали на них, фотографируя, обозначая географические координаты участка с помощью *Sapelli*, и конфисковали их пилы. При поддержке местных властей таким образом удалось прекратить все незаконные рубки леса.

Основой для этих достижений служит тот факт, что во многих частях света богатство видов флоры и фауны сохранилось именно благодаря народам, жившим на этих территориях сотни и тысячи лет. Коренные народы выступают также самыми яркими защитниками окружающей среды, потому что они потеряют больше всего, если она будет разрушена.

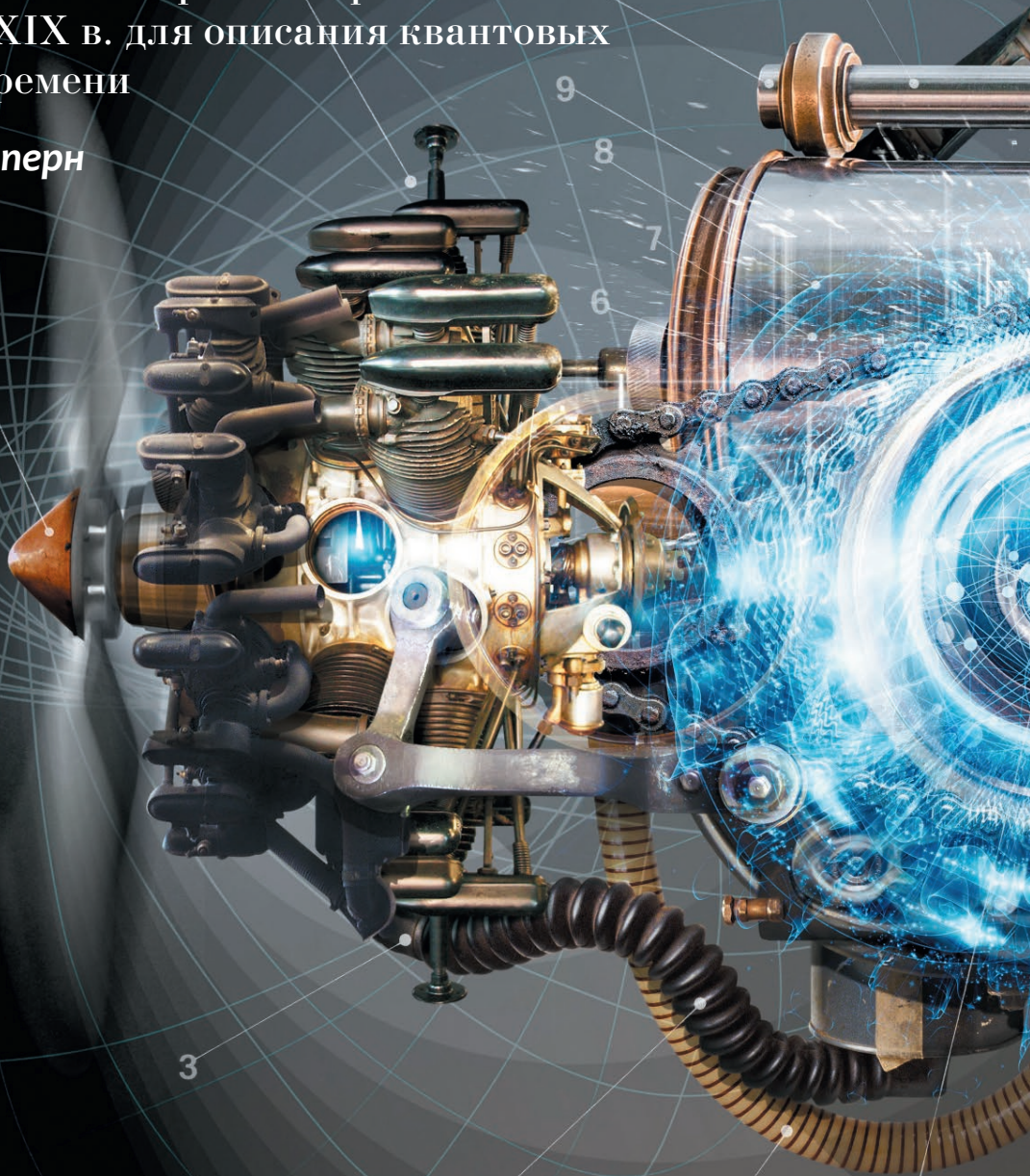
Когда я последний раз был в Конго в 2019 г., Эмека попросил меня передать послание читателям *Scientific American*: «Мы — хранители леса. Мы были здесь всегда, заботились о лесе. С начала времен убивали зверей, и они всегда были в лесу для нас. Мы убиваем животных для того, чтобы прокормить наших детей. Не обрабатываем землю! Не ловим рыбу! Но теперь экотражи останавливают нас; они запретили ходить в лес... Мы хотим, чтобы нашим детям не приходилось идти далеко искать животных, чтобы они были близко к тому месту, где остановились, как это было раньше, когда мы заботились о лесе. Но наш мир разрушен. Решите эту проблему, люди, чтобы мы снова могли познать радость!»

Перевод: С.М. Левензон

Квантовый ст

Подобно тому как в жанре стимпанка стиль викторианской эпохи переплетается с современной техникой, новая область физики приспосабливает термодинамику XIX в. для описания квантовых систем нашего времени

Николь Юнгер Халперн



ИМПАНК



19

17

8

14

13

21

26

11

15

10

16

ОБ АВТОРЕ

Николь Юнгер Халперн (Nicole Yunger Halpern) — физик-теоретик, научный сотрудник Института теоретической, атомной, молекулярной и оптической физики Гарвардского университета. Ежемесячно публикует статьи в блоге «Квантовые горизонты» Института квантовой информации и материи Калифорнийского технологического института.



Лондон, час, когда Розалинда была рада, что стащила черный плащ своего брата и надела его вместо своего алого. Расположенная рядом фабрика на ночь перестала изрыгать дым, но скоро опять начнет. Какой-то шум заставил ее отступить к кирпичной стене. Подняв глаза, она раскрыла рот от изумления. Большое продолговатое неповоротливое судно медленно проплывало по небу. Темнота скрывала детали, но ей и не нужно было видеть: на его борту наверняка был нарисован латунный замок. Это Меллатор поднял в небо свой дирижабль.

Добро пожаловать в стимпанк! За последние несколько десятилетий этот жанр прочно вошел в литературу, изобразительное искусство и кинематограф. События его, как правило, разворачиваются поблизости от зарождающихся фабрик и в покрытых сажей городах, в Англии индустриальной эпохи и на Диком Западе — в реальном мире, где бурно росла и развивалась техника. Персонажи стимпанка превращают эти изобретения в футуристические механизмы, включая автоматические устройства и машины времени. Подобный союз старого и нового создает атмосферу романтики и приключений. Неудивительно поэтому, что почитатели стимпанка покупают цилиндры и нижние юбки, надевают украшения из латуни и стекла и стекаются на фестивали.

Эти фанаты мечтают о приключениях. Но уже сегодня физики, которые работают на стыке трех областей — квантовой физики, теории информации и термодинамики, — живут в них. Аналогично тому как стимпанк переплетает научно-фантастическую технику с викторианским стилем, современная область физики, которую я называю «квантовым стимпанком», соединяет технику XXI в. с научными принципами XIX в.

Наша цель — модернизировать законы термодинамики, науки, которая изучает работу, теплоту и эффективность, в соответствии с требованиями самых продвинутых экспериментов, передовой техники и теории. Термодинамика родилась на гребне волны промышленной революции, вызванной изобретением паровой машины.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Термодинамика, область физики, которая изучает тепловые процессы и КПД, возникла во время промышленной революции. Сегодня ученые работают над тем, чтобы придать этим законам современный вид и их можно было бы применять для задач современной техники, в частности к квантовым компьютерам и системам квантовой связи и квантовой информации.
- Эта область, в которой наука XIX в. соединилась с футуристической техникой, чем-то напоминает сочетание викторианского стиля и научно-фантастических изобретений в произведениях жанра, называемого стимпанком, и поэтому получила название «квантовый стимпанк».
- Один из недавних успешных примеров квантового стимпанка — предложенный учеными мотор на основе принципов квантовой механики и термодинамики.

Но по мере миниатюризации техники происходит объединение термодинамики и теории информации во все более мелких, микроскопических системах. Центр внимания ученых с паровозов переместился на двигатели нанометровых масштабов, молекулярные моторы живых клеток и холодильники минимально возможного размера. Теперь мы должны понять, как традиционные термодинамические понятия, такие как «тепло», «работа» и «термодинамическое равновесие», применять к современным квантовым системам.

Викторианская физика встречается с наукой нового тысячелетия

К 1800 г. Томас Севери и Томас Ньюкомен изобрели, а Джеймс Уатт и Мэттью Болтон усовершенствовали паровую машину. Ученых тогда интересовало, насколько эффективно такие машины смогут откачивать воду из шахт. Их поиски решения чисто практических задач переросли в исследования фундаментальной физики — например, почему время течет только в одном направлении. Вся термодинамика основана на этой работе.

Этот раздел физики описывает системы многих частиц, такие как пар, в терминах макроскопических свойств, таких как температура, давление, объем и энергия. Энергия в переходном состоянии подразделяется на два класса: работа и теплота. Работа — это хорошо организованная энергия, которую можно использовать для таких целей, как вращение мельничного колеса. Тепло — это энергия случайного движения — колебания частиц.

Степень хаотичности [системы] физики количественно описывают с помощью величины, называемой энтропией. Каждая частица пара характеризуется своими координатами и импульсом (масса частицы, умноженная на ее скорость). Совокупность координат и импульсов всех частиц мы называем микроскопическим состоянием пара. Мы не в состоянии описать микросостояние системы, потому что в паровом котле содержится порядка 10^{24} частиц. Представьте, что вы пытаетесь найти координаты и скорость каждой из них! Вместо этого мы определяем вероятность того, что пар находится в том или ином микросостоянии. Энтропия количественно характеризует эту неопределенность. Согласно второму закону термодинамики, энтропия замкнутой изолированной системы не может уменьшаться. Этот факт лежит в основе того обстоятельства, что время течет в одном направлении.

Но паровые машины, ставшие центральным элементом традиционной термодинамики, напоминают современную технику примерно так же, как шляпы-цилиндры похожи на шлемы виртуальной реальности. Во многих современных устройствах и экспериментальных установках используют сложные квантовые системы малых размеров.

Квантовая теория описывает физику атомов, электронов и других составляющих материи. Они могут вести себя образом, абсолютно невозможным для больших классических систем, таких как паровые котлы, фабрики и люди. Например, квантовые частицы могут быть квантово перепутанными, демонстрируя нечто вроде сверхсильной корреляции. Если вы создадите два квантово перепутанных атома и проведете измерение одного из них, состояние другого мгновенно изменится, даже если он находится на другом конце континента. Физики могут использовать квантовое перепутывание для обработки информации способами, невозможными для классических систем. Наука о том, как мы можем решать сложные вычислительные задачи, совершенствовать средства коммуникаций, защищать информацию и повышать точность измерений с помощью квантовых систем, называется квантовой теорией информации. Эта теория — удобный математический инструментарий для применения новых знаний в приложении к термодинамике. Как же нам удастся объединить две области науки? Чтобы рассуждать об информации, мы должны противостоять незнанию. Так же как и физики, специалисты в области теории информации измеряют степень незнания (*степень неопределенности*. — *Примеч. пер.*) величиной энтропии.

Например, квантовые компьютеры — это системы, в которых ключевую роль играют как квантовая теория информации, так и термодинамика. Google, IBM, другие компании и университеты напряженно работают над созданием машин, задача которых — взламывать определенные схемы шифрования и моделировать новые материалы гораздо быстрее, чем любой классический компьютер. Большинство систем квантовых вычислений необходимо охлаждать до температуры, близкой к абсолютному нулю. Охлаждение сводится к рассеиванию тепла, термодинамической величины. В то же время квантовые компьютеры совсем не похожи на машины, для которых была разработана [классическая] термодинамика.

Попытки применить термодинамические понятия к квантовым системам относятся к середине XX в., когда Джозеф Джойсик (Joseph Geusic), Эрих Шульц-Дюбуа (Erich Schulz-DuBois) и Генри Деррик Сковил (Henry Derrick Scovil) предложили первый квантовый двигатель. Он был изготовлен на основе мазера (устройства, которое работает как лазер, но излучает в СВЧ-диапазоне). Позже Ронни Козлофф (Ronnie Kosloff) из Еврейского университета в Иерусалиме и его коллеги помогли выделить квантовые двигатели в отдельную область науки. Другой пионер — Марлан Скалли (Marlan Scully), которого иногда называют «квантовым ковбоем», — занимается квантовой оптикой в Принстонском университете и Техасском

Прорисовка концепции квантового двигателя

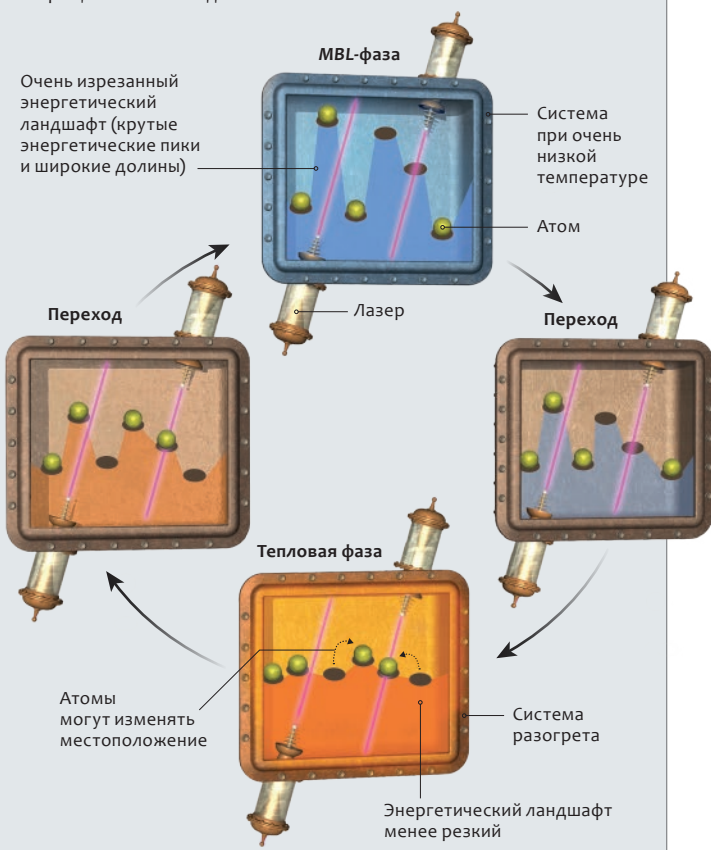
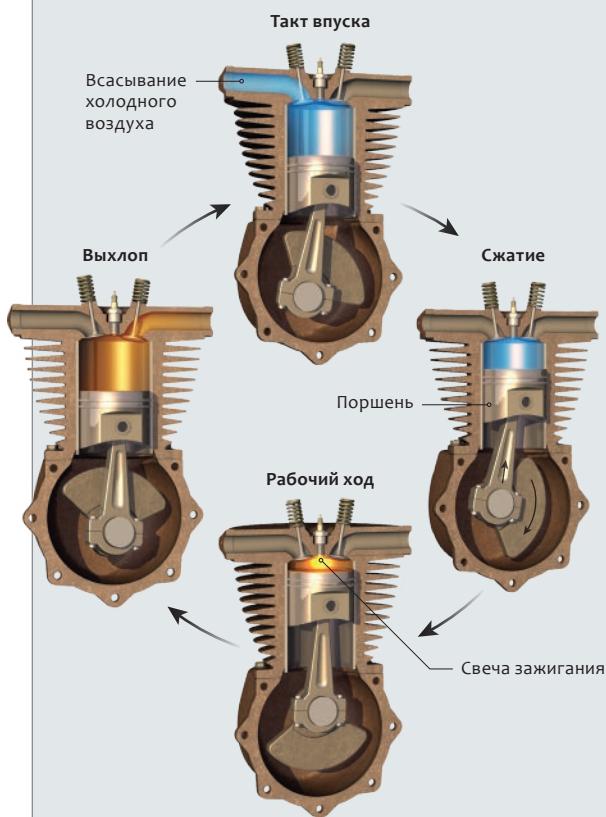
Термодинамика как область физики возникла в эпоху паровых машин. Физики «квантового стимпанка» работают над модернизацией этой области физики для применения к квантовой технике, такой как квантовые двигатели. Один из таких моторов на основе принципа многочастичной локализации, *MVL-мобиль*, показанный здесь, существует пока только как мысленный эксперимент, но, возможно, будет построен в недалеком будущем. Так же как в автомобильном двигателе циклический процесс, заставляющий машину двигаться, состоит из четырех тактов, *MVL-мобиль* для совершения работы проходит через четырехступенчатый квантовый процесс.

Автомобильный двигатель

Двигатель автомобиля всасывает холодный воздух и выбрасывает горячий в ходе четырехступенчатого цикла, который толкает машину вперед. Во время такта впуска двигатель втягивает в цилиндр холодный воздух; впрыскивается бензин. Во время такта сжатия поршень движется внутри цилиндра вверх, чтобы сжать эту смесь. Затем во время такта рабочего хода искра свечи зажигания воспламеняет воздушно-бензиновую смесь. Горячие газы давят на поршень, заставляя его двигаться вниз, и крутят колеса автомобиля. Наконец, во время такта выпуска горячая смесь продуктов сгорания выбрасывается наружу.

Двигатель на основе многочастичной локализации

MVL-мобиль проходит через четырехэтапный процесс, который начинается, когда атомы пребывают в фазе, называемой многочастичной локализацией. Атомы охлаждены до сверхнизких температур и находятся в поле с высокими энергетическими пиками и долинами с низкой энергией, которое удерживает атомы от больших перемещений. Затем мы меняем параметры лазерного излучения таким образом, чтобы вершины энергетического ландшафта сравнялись с долинами. Двигатель переходит в тепловую фазу, когда атомы могут свободно перемещаться, и двигатель поглощает энергию. Наконец, мы снова возвращаем все в исходное состояние.



аграрно-техническом университете, а также разведением крупного рогатого скота. Тем временем теоретики Джан Паоло Беретта (Gian Paolo Beretta), а также покойные Элиас Гифтопулос (Elias Gyftopoulos) и Джордж Хатсопулос (George Natsopoulos) изучали направление течения времени с квантовой точки зрения.

Основополагающей работой стала докторская диссертация 1988 г. Сета Ллойда (Seth Lloyd) «Черные дыры, демоны и потеря согласованности: как сложные системы получают информацию и что они с ней делают» (*BlackHoles, Demons, and the Loss*

of Coherence: How Complex System Get Information, and What They Do with It), которую он защитил в Рокфеллеровском университете и в которой были заложены многие важные идеи в области квантовой термодинамики.

Инструменты квантового стимпанка

Как мы уже видели, энтропия играет важную роль в термодинамике, теории информации и квантовой теории. Энтропию часто рассматривают как единое понятие, но на самом деле различные виды энтропии существуют в форме различных

математических функций, описывающих различные условия. Самые известные типы были введены в термодинамику Людвигом Больцманом и Джошуа Гиббсом в 1800-х гг., в теорию информации — сотрудником компании *Bell Telephone Labs* Клодом Шенноном в 1948 г. и в квантовую теорию информации — физиком-теоретиком Джоном фон Нейманом в 1932 г. Эти виды энтропии количественно определяют не только степень неопределенности, но и эффективность, с которой мы можем выполнять задачи по обработке информации, такие как сжатие данных, и задачи термодинамики, такие как работа двигателя автомобиля.

Нахождение новых энтропийных функций для современных малых квантовых систем — одна из ключевых задач теоретиков квантового стимпанка. Предположим, мы пытаемся использовать квантовую перепутанность для обмена информацией в определенном канале. Мы можем спросить: существует ли теоретический предел тому, насколько эффективно мы можем выполнить эту задачу? Ответ, вероятно, будет зависеть от энтропии.

Другая цель квантового стимпанка — построение того, что физики называют теориями ресурсов. Эти теории особое внимание уделяют ограничениям, при которых мы работаем. Например, первый закон термодинамики вынуждает нас сохранять энергию: мы не можем породить или уничтожить энергию; мы можем только преобразовывать ее из одной формы и одной системы в другую. Физики могли бы придумать состояние, в котором существует ограничение, например среду с фиксированной температурой, а затем попытаться математически смоделировать его с помощью теории ресурсов. Используя теорию ресурсов, мы можем рассчитать максимальную эффективность, с которой может быть выполнена та или иная задача. Эффективность, как правило, равна одной из функций энтропии.

Третья область внимания в наших поисках обновленной термодинамики — вывод уравнений, называемых флуктуационными соотношениями. Эти уравнения — продолжение второго закона термодинамики, который утверждает, что энтропия в замкнутой изолированной системе не может уменьшаться. Флуктуационные отношения описывают небольшие системы, на которые воздействуют большие силы, и говорят нам о работе, которую эти силы выполняют.

В 1996 г. Кристофер Яжинский (Christopher Jarzynski), в настоящее время работающий в Университете штата Мэриленд, доказал одно из самых известных флуктуационных соотношений. Физики называют его уравнением (или равенством) Яжинского, хотя сам Яжинский из скромности никогда так его не именуется. Экспериментаторы используют это уравнение для измерения определенных термодинамических свойств малых систем.

В качестве примера: представьте, что нить ДНК плавает в воде с такой же температурой, что и ее собственная. Нить обладает некоторым количеством свободной энергии. Последняя, собственно говоря, представляет собой энергию, которую система может использовать, чтобы совершить работу. С помощью лазеров ученые могут удерживать один конец нити и тянуть за другой. После того как некоторое время нить ДНК остается растянутой, ее температура снова сравнивается с температурой раствора, но в результате свободная энергия нити изменится. Эта разница в свободной энергии используется в химии, фармакологии и биологии. Мы можем оценить разницу в величине свободной энергии, многократно растягивая нить, измеряя работу, требуемую в каждом случае, подставляя полученные данные в уравнение Яжинского и решая его.

Первый закон термодинамики вынуждает нас сохранять энергию: мы не можем породить или уничтожить энергию; мы можем только преобразовывать ее из одной формы и одной системы в другую

Сколько измерений следует провести, задались мы с Яжинским вопросом, чтобы оценить разницу свободной энергии с требуемой точностью? Мы рассчитали, какое минимальное количество измерений, вероятно, необходимо выполнить, и предложили схему оценки точности с использованием теории информации малых систем.

В другой работе мы с коллегами показали, что флуктуационные соотношения и новомодные энтропийные функции — два равноправных подхода к термодинамике микромасштаба, и использовали каждый из них для вывода другого. Физики в Лондоне, Кельне и в других местах расширили и углубили это исследование.

Новая квантовая машина

Так же как традиционная термодинамика помогла описать физику паровых машин, наши усилия в области квантовой термодинамики смогут помочь нам изобретать квантовые машины. Экспериментаторы уже создали квантовые машины на основе фотонов (частиц света), электронные системы и сверхпроводящие кубиты (квантовые цепи, в которых ток может течь бесконечно долго, не затухая).

Недавно мы вместе с Кристофером Уайтом (Christopher D. White), в настоящее время работающим в Университете штата Мэриленд, Сарангом Гопалакришнаном (Sarang Gopalakrishnan), сейчас в Городском университете Нью-Йорка, и Гилом Рефаэлем (Gil Refael) из Калифорнийского технологического института разработали новую квантовую машину. Будучи теоретиками, мы сначала придумали машину, которая существовала только в наших головах, как идею для мысленного эксперимента. Но мы также предлагаем способ, как можно построить версию машины, используя квантовые инструменты, имеющиеся в лабораториях уже сегодня. Например, охлаждая атомы, а затем захватывая их и манипулируя ими с помощью лазеров, можно реализовать нашу конструкцию практически.

В термодинамике сохраняются едва уловимый запах солидола и угольной пыли, шум укутанных клубами пара первых поездов, нарушающих безмолвие сельского пейзажа, и борющихся с волнами первых океанских лайнеров, возгласы восхищения ландшафтом, открывающимся с летящего в небе воздушного шара

В нашей машине используется фаза вещества, называемая многочастичной локализацией (*MBL*), — еще одно состояние материи помимо знакомого всем жидкости, твердого тела и газа. Квантовые частицы могут пребывать в этой фазе, если они испытывают силы взаимного отталкивания и могут медленно колебаться в условиях неровного, крутого, случайного ландшафта. Ключевой элемент системы *MBL* — ее «атермичность», поскольку она не находится в тепловом равновесии. Частицы, находящиеся в тепловом равновесии, перемещаются по всему доступному пространству быстро и случайным образом. Если вы предоставите пару возможность находиться в определенном сосуде в течение длительного времени,

макроскопические параметры, такие как температура и объем, в конце концов установятся и перестанут сильно изменяться.

Но *MBL*-частицы в отличие от частиц пара не перемещаются, а остаются в одной и той же области. Отсутствие теплового равновесия служит ресурсом в задачах термодинамики. Автомобильные двигатели, например, работают, используя разницу температур горячих газов и холодного окружающего воздуха. Газы не находятся в тепловом равновесии, потому что горячие частицы локализованы в одной области, а холодные — в другой и ни одна из частиц не может перемещаться по всему пространству. Поскольку автомобильный двигатель использует для своей работы атермичность газовых смесей, я и мои сотрудники использовали атермичность частиц многочастичной локализации. Мы называем нашу конструкцию *MBL*-мобилем.

Работа автомобильного двигателя проходит за четыре такта, которые образуют полный, или замкнутый, цикл. К концу цикла двигатель возвращается в исходное состояние, перемещая автомобиль на некоторое расстояние путем передачи тепла горячих газов холодной окружающей среде. *MBL*-мобиль также проходит четырехступенчатый цикл. В цикле нашего двигателя мы поочередно переводим атомы из тепловой фазы, в которой частицы могут разлетаться по всему пространству, в фазу *MBL* и обратно. Чтобы привести в движение двигатель, мы изменяем окружающую среду, в которой находятся частицы, с довольно плоской на неровную, меняя настройки лазеров. Перед началом каждого такта двигатель обменивается теплом с внешней средой. Двигатель взаимодействует с горячей средой, когда он находится в своей тепловой фазе, и с холодной средой, когда он находится в фазе *MBL*. Таким образом, мы имеем четыре такта: (1) теплообмен с горячей средой в тепловой фазе, (2) переход из тепловой фазы в *MBL*, (3) теплообмен с холодильником и (4) переход из фазы *MBL* в тепловую.

Мы оценили, насколько хорошо может работать *MBL*-мобиль, рассчитав его мощность и КПД и сравнив их с аналогичными показателями других двигателей. Например, у некоторых бактерий есть жгутики — длинные гибкие хвосты, вращающиеся с помощью биологического моторчика. Каким же образом нам эти маленькие моторчики сравнить с нашим? По нашим оценкам, наш двигатель в десять раз мощнее жгутика. С другой стороны, каким образом наш квантовый мотор сравнить с двигателем автомобиля? Мы оценили удельную мощность двух моторов, то есть их выходную мощность на единицу рабочего объема: автомобильный двигатель более эффективно использует пространство, но примерно всего лишь в десять раз.

Фаза многочастичной локализации дает нашему мотору четыре преимущества. Во-первых, он может быть любого размера — от десяти частиц до бесконечности. Чтобы построить большой двигатель, можно начать с мини-мотора из десяти частиц. Вы строите множество копий мини-мотора, а затем заставляете их работать совместно. Если бы мини-моторы вели себя как тепловые, они влияли бы друг на друга, потому что частицы одного попадали бы в другой. Многочастичная локализация гарантирует, что все, находящееся в одном мини-моторе, остается там. Таким образом, можно поместить множество мини-моторов рядом друг с другом, обеспечив высокую удельную мощность всего двигателя, — это второе преимущество *MBL*-мобиля.

Третье преимущество проявляется, если вы проводите много испытаний двигателя. В некоторых случаях он будет производить работу. Однако в небольшом числе испытаний двигатель будет не производить, а, наоборот, потреблять работу. Таких «неправильных» испытаний происходит меньше, если вы переводите двигатель из *MBL*-фазы в термическую, чем когда переход целиком происходит в фазе *MBL*. Более того, величина работы меньше изменяется от одного успешного испытания к другому, если вы используете *MBL*; *MBL* повышает надежность двигателя.

Успех нашего *MBL*-мобиля, по крайней мере в мысленных экспериментах, позволяет предположить, что многочастичная локализация может найти применение и в других требующих решения термодинамических задачах. Представьте, например, что мы запустили наш цикл в обратном направлении. Двигатель должен охлаждать, передавая тепло из холодной среды в горячую. Чтобы проявились такие свойства, как квантовая перепутанность, квантовые системы необходимо охлаждать. Холодильник на основе многочастичной локализации сможет охлаждать многочастичные квантовые системы. Как вариант, ученые предложили также использовать *MBL* для хранения энергии. А недавно мы вместе с моими сотрудниками приступили к созданию рабочей версии двигателя с помощью другого набора инструментов — сверхпроводящих квантовых битов в магнитном поле. Существует масса практических решений, когда мы применяем к материаловедению мышление в стиле квантового стимпанка.

Взгляд сквозь квантовый монокль

Приверженка стимпанка всматривается в будущее через монокль. Что она там видит? Математический и физический инструментарий выковывается на стыке квантовой теории, теории информации и термодинамики. Мы работаем также, чтобы применить этот инструментарий в других разделах науки — материаловедении (как в случае

MBL-мобиля), химии, физике высоких энергий, для разгадки тайн черных дыр и материи пространства-времени, а также в атомной и молекулярной физике и в оптике.

Технологии настойчиво требуют применения. Большинство работ по квантовому стимпанку имеют теоретический характер, хотя эксперименты по практическому использованию уже начались и множатся. Но так же как развитие термодинамики послужило мощным толчком промышленной революции, квантовая, информационная термодинамика и термодинамика микросистем должны стимулировать новые изобретения. *MBL*-двигатели не станут источником механической энергии наших автомобилей в этом десятилетии. Но молекулярные переключатели, преобразователи солнечной энергии и рассеивающие тепло транзисторы — это микротехника на основе термодинамики. Они должны направлять теорию.

Другая задача — объединить в квантовом стимпанке разрозненные усилия: новомодные виды энтропии, различные теории ресурсов, флуктуационные соотношения, квантовые тепловые машины и многое другое. Это лишь некоторые из множества различных видов работ, ведущихся во всем мире, и новые инструменты, находящиеся в стадии разработки. Согласование различных определений и результатов этих областей укрепит теорию квантовой термодинамики.

В термодинамике сохраняются едва уловимый запах солидола и угольной пыли, шум укутанных клубами пара первых поездов, нарушающих безмолвие сельского пейзажа, и борющихся с волнами первых океанских лайнеров, возгласы восхищения ландшафтом, открывающимся с летящего в небе воздушного шара. Наука о квантовой информации меняет наше представление о вычислениях, средствах связи, криптографии и измерениях. Вы читаете об этом слиянии старого и нового в журнале *Scientific American*, но с тем же успехом могли бы держать в руках роман Герберта Уэллса или Жюль Верна. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Руби М. Длинная рука второго закона // ВМН, № 2, 2009.
- Quantum Steampunk: Quantum Information, Thermodynamics, Their Intersection, and Applications Thereof across Physics. Nicole Yunger Halpern. Ph.D. dissertation, California Institute of Technology, 2018.
- Quantum Engine Based on Many-Body Localization. Nicole Yunger Halpern et al. in *Physical Review B*, Vol. 99, No. 2, Article No. 024203; January 2019. <https://journals.aps.org/prb/pdf/10.1103/PhysRevB.99.024203>



БЕЗОПАСНОСТЬ

GPS

ПОД

Мы доверяем
системе *GPS*,
но оказалось,
что взломать ее
несложно — и что
у США нет защиты
от взлома

УГРОЗОЙ

Пол Таллис

ОБ АВТОРЕ

Пол Таллис (Paul Tullis) — журналист, проживающий в Амстердаме; в своих материалах затрагивает темы на стыке фундаментальной и прикладной наук, а также бизнеса; в одной из предыдущих статей он рассказал о том, каким образом растущий поток туристов приводит к разрушению Галапагосских островов (*Снасти Галапагос // ВМН, № 5–6, 2016*).



В

тот день, 5 августа 2016 г., в международном аэропорту Манилы им. Ниноя Акино ожидалось прибытие рейса *Cathay Pacific 905* из Гонконга. И вдруг во время полета на борту случилась чрезвычайная ситуация: на расстоянии восьми морских миль (14,8 км) от взлетно-посадочной полосы аэропорта летчики сообщили, что потеряли сигнал *GPS*.

Озадаченные авиадиспетчеры разрешили пилотам сажать широкофюзеляжный *Boeing 777-300* вручную. Тогда самолет сел благополучно, хотя поволноваться пришлось не на шутку. К счастью, в тот день небо было почти ясное.

Случай с рейсом *Cathay Pacific 905* — не единственный. Только за два месяца того же года, в июле и августе, Международная организация гражданской авиации (*ICAO*) получила из аэропорта Манилы более 50 сообщений о помехах, которые препятствовали работе *GPS*. В некоторых случаях летчикам приходилось увеличивать скорость самолета и заходить на второй круг. Понятно, что подобные маневры повышают вероятность ошибки пилотирования. В одном из своих документов, выпущенном в апреле 2019 г., *ICAO* сделала вывод, что современная авиация зависит от бесперебойного доступа к спутниковым системам, которые помогают определять местоположение, осуществлять навигацию и определять точное время, причем слабых мест и угроз для таких спутниковых систем становится все больше и больше.

За последние годы как минимум в четырех крупных аэропортах возникали аварийные ситуации, когда заходящие на посадку самолеты внезапно теряли сигнал *GPS*. Так, например, по данным Системы информирования о безопасности полетов *NASA*, в июне в штате Айдахо пассажирский самолет при заходе на посадку чуть не врезался в гору. Только вмешательство авиадиспетчера предотвратило катастрофу. Специалисты по безопасности и аэрокосмическим исследованиям проанализировали аварийные ситуации и пришли к выводу, что в нескольких случаях вероятной причиной стало вмешательство хакеров. По мнению Мартина Лаута (*Martin Lauth*), бывшего авиадиспетчера, а в настоящее время адъюнкт-профессора в области управления воздушным движением из Университета аэронавтики Эмбри — Риддла в штате Флорида, искусственные помехи, мешающие приему сигнала *GPS*, в лучшем случае приведут к значительной задержке времени прилета рейса, ведь экипаж вынужден будет на подлете к аэропорту менять курс, а это дорого обойдется и авиакомпаниям,

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Хакеры научились глушить сигналы *GPS*, по которым прокладывают курс самолеты. Электрические сети, фондовый рынок и прочие системы также используют *GPS* для синхронизации своей деятельности.
- Хакерам вполне по силам подавить сигналы *GPS* при помощи создания активных помех или спуфинга (имитационных помех; от англ. *spoofing* — «незаконный перехват сигнала и его дальнейшая передача в измененном виде незаметно для получателя»), причем для этого не требуется специальная подготовка, а также сложная и дорогостоящая аппаратура.
- Во многих странах на случай непредвиденных обстоятельств создана резервная система навигации наземного базирования, основанная на технологии *eLoran*. Вывести ее из строя с помощью активных помех или спуфинга очень непросто. Однако в США такая резервная система отсутствует.



Спутники GPS (1) сообщают точное время центрам хранения и обработки данных, таким как центр (2) в Секокусе, штат Нью-Джерси, координирующий проведение операций на крупных фондовых биржах

и пассажирам. Выход из строя системы GPS — это веская причина для приостановки работы аэропорта. Если в крупных аэропортах вокруг города Нью-Йорка хакеры взломают GPS, а заодно и так называемые системы инструментального захода на посадку, то возникнет сложная проблема: куда перенаправлять прибывающие рейсы? К тому же на трансокеанских направлениях самолету при таких маневрах на подлете может просто не хватить горючего.

Мы привыкли использовать систему GPS как помощника-гида, который водит нас в рестораны и на свидания. Но у нее больше возможностей. Возьмем, например, измерение времени с помощью GPS — эта функция уже стала неотъемлемой частью каждого из 16 инфраструктурных секторов экономики, причем, по мнению Министерства

внутренней безопасности США, ключевых. Сети сотовой связи, финансовые рынки, электросети, службы экстренной помощи и многое другое — для них просто необходима синхронизация операций. Но вдруг оказывается, что GPS уязвима. Поскольку между спутниками и наземными приемниками расстояния гигантские, радиоволнам приходится преодолевать дистанцию почти в 20 тыс. км. Из-за этого сигналы слабеют, а значит, их нетрудно подавить, заглушить с помощью помех, как это, очевидно, и произошло тогда в манильском аэропорту с рейсом *Cathay Pacific 905*. Кроме того, хакерам нетрудно сымитировать сигнал GPS, организовать так называемую спуфинговую атаку. Для этого достаточно взять программно определяемую радиосистему, установить ее на обычный ноутбук и сгенерировать сигнал мощнее, чем у спутника GPS, затем послать на GPS-приемник ложное сообщение (или же воспроизвести достоверное, незаметно добавив в него немного ложных данных), в результате GPS-приемник получит неверные координаты и время.

Для ключевых инфраструктурных объектов, на которых установлена чувствительная аппаратура, задержка GPS-сигнала всего на несколько микросекунд способна вызвать каскадные отключения и в конечном итоге отключение всей системы целиком. Журнал *Scientific American* решил выяснить мнение по этому вопросу у адъюнкт-профессора Тодда Хамфриса (Todd Humphreys), специалиста в области аэрокосмической техники из Техасского университета в Остине. Даны Говарда (Dana Goward), члена Национального консультативного совета (федерального комитета) США по позиционированию, навигации и синхронизации в космическом пространстве, бывшего руководителя одного из ключевых подрядчиков Министерства обороны. Оба специалиста выразили свою обеспокоенность тем, что зарубежные хакеры и террористические группы способны с помощью глушения и спуфинга осуществлять скоординированные атаки в отношении GPS-приемников, наносить мощные удары по электрическим и сотовым сетям, по фондовым рынкам, больницам, аэропортам и т.д. — словом, неожиданно атаковать и оставаться незамеченными.

Настоящим откровением для нас стал тот факт, что у соперников США подобной уязвимости не наблюдается. Так, у Китая, России и Ирана имеются резервные системы навигации наземного базирования, на которые могут переключаться пользователи GPS, и эти системы подавить гораздо сложнее, чем спутниковую систему GPS. Однако Соединенным Штатам не удалось выполнить президентскую директиву 2004 г., предусматривающую создание американской дублирующей системы. Правда, в США никаких чрезвычайных ситуаций с GPS пока не происходило. Неужели нашим

GPS: надежная, но уязвимая

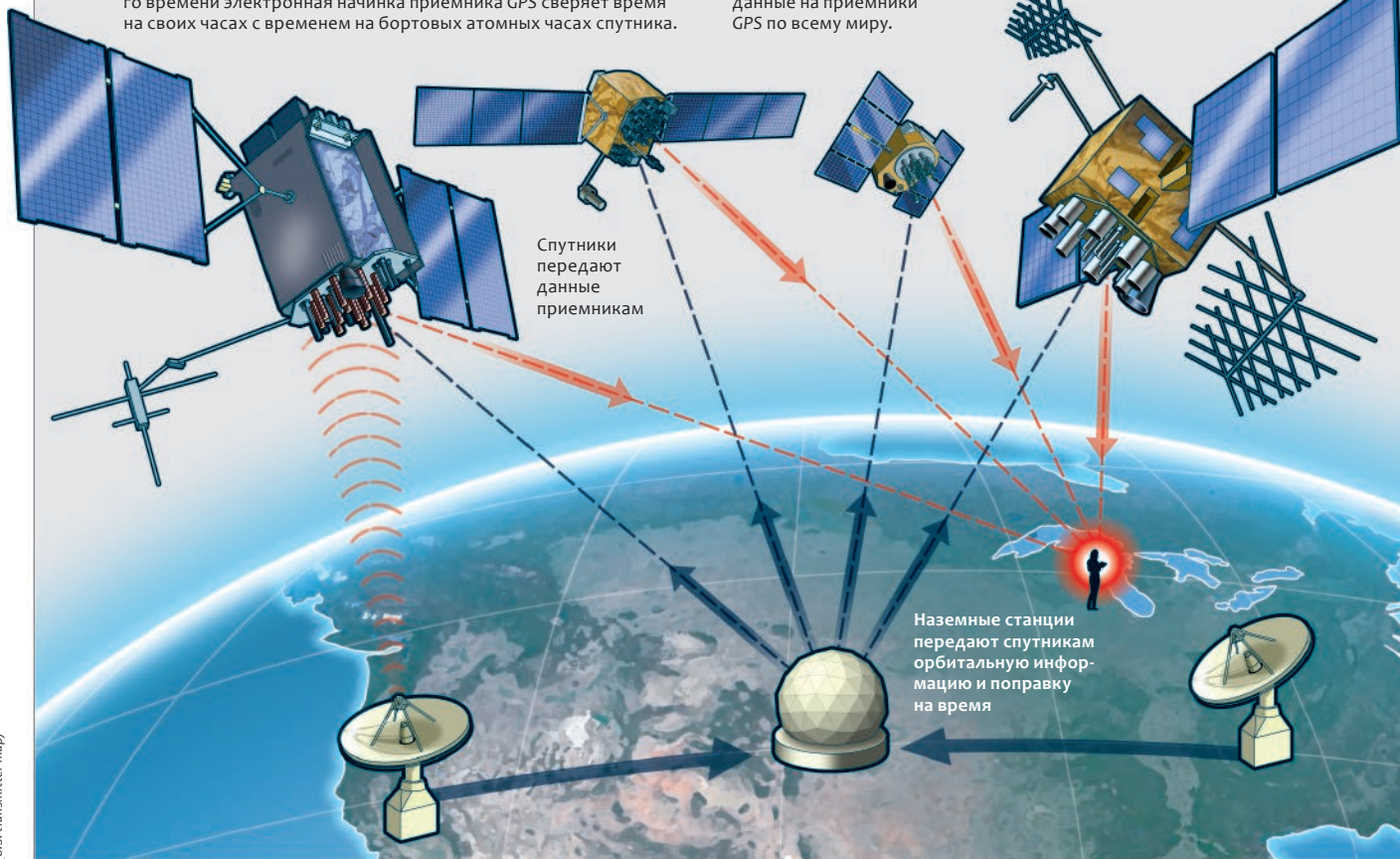
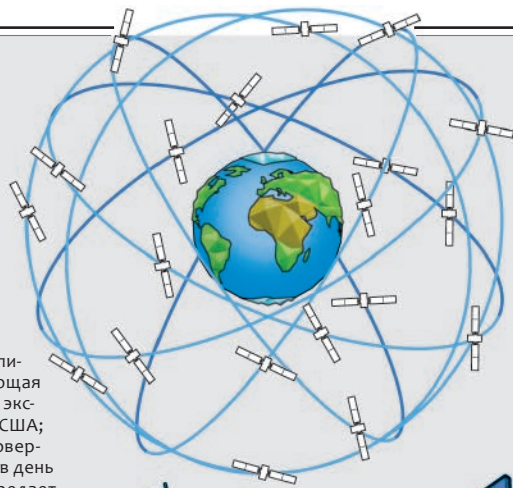
Электрические сети, фондовые рынки, банки, авиалайнеры и сотовые сети — все они зависят от спутниковой GPS, с помощью которой удобно определять точное время и синхронизировать свою деятельность. Хакерам несложно нарушить работу системы GPS и установить неправильное время. Это потенциально может привести к опасным последствиям. У многих стран на случай хакерской атаки имеется резервная система навигации наземного базирования, но в США такой, увы, нет.

Как работает GPS

Спутники GPS излучают синхронизированные сигналы, с помощью которых в любой момент можно определить координаты спутников и время. GPS-приемник (человек в красном круге) для точного определения своего местоположения должен принять сигналы как минимум от четырех спутников и сравнить данные о временных задержках при распространении радиосигналов от спутников до антенны GPS-приемника. Для определения точного времени электронная начинка приемника GPS сверяет время на своих часах с временем на бортовых атомных часах спутника.

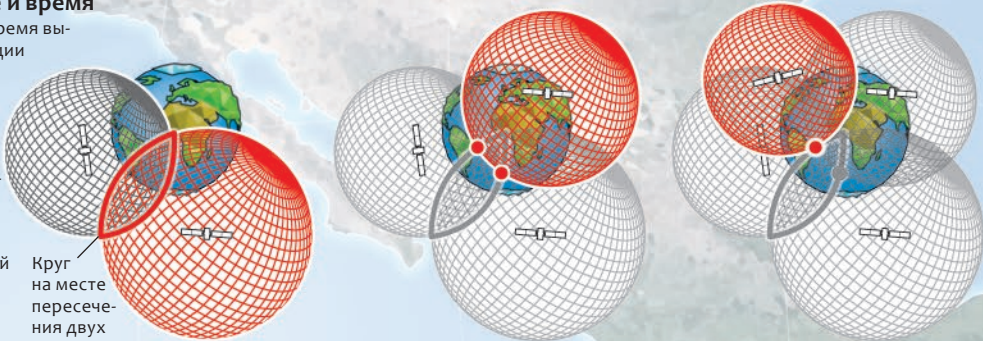
Спутниковая группировка

Космическая группировка, насчитывающая 31 спутник Navstar, эксплуатируется ВВС США; каждый спутник совершает по два витка в день вокруг Земли и передает данные на приемники GPS по всему миру.



Точные местоположение и время

Координаты приемника GPS и время вычисляются методом трилатерации с помощью четырех спутников. Сигнал от первого спутника помогает определить расстояние до приемника, помещая приемник где-то на поверхности сферы. С помощью двух спутников мы локализуем местонахождение приемника где-либо на окружности, образованной пересечением двух сфер. Третий спутник позволяет определить две точки на окружности. Четвертый спутник определяет одну точку и время в этой точке.



Два вида хакерских атак

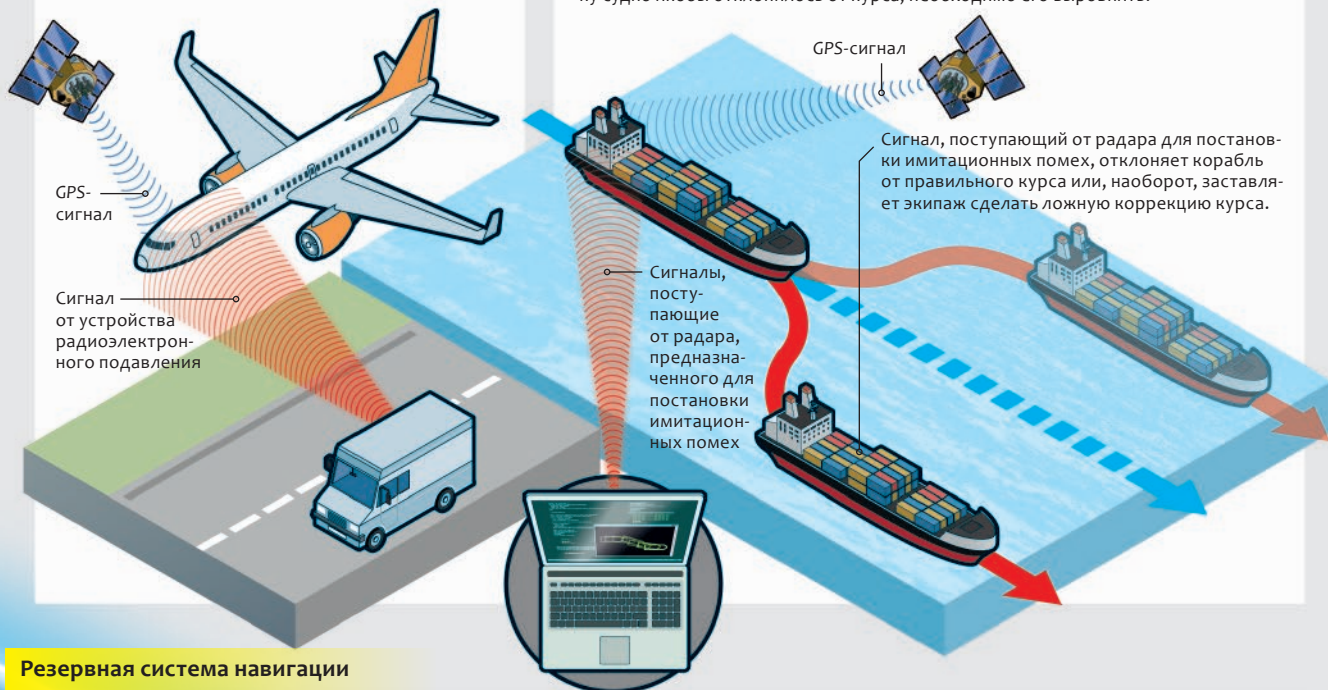
Искажение сигнала, поступающего от GPS-спутника, может привести к отключению электросетей, краху фондового рынка, авиакатастрофе во время приземления. Хакеры научились глушить радиоволны, транслируемые GPS-спутниками, или создавать имитационные помехи (спуфинг).

Глушение

Сигналы, передаваемые спутниками GPS, при достижении поверхности Земли имеют очень малую мощность. Находясь поблизости от GPS-приемника, хакер способен заглушить сигналы спутника с помощью шумовых помех, передаваемых на той же частоте, из-за чего GPS-приемник не сможет остаться на связи и поймать сигналы GPS-спутника.

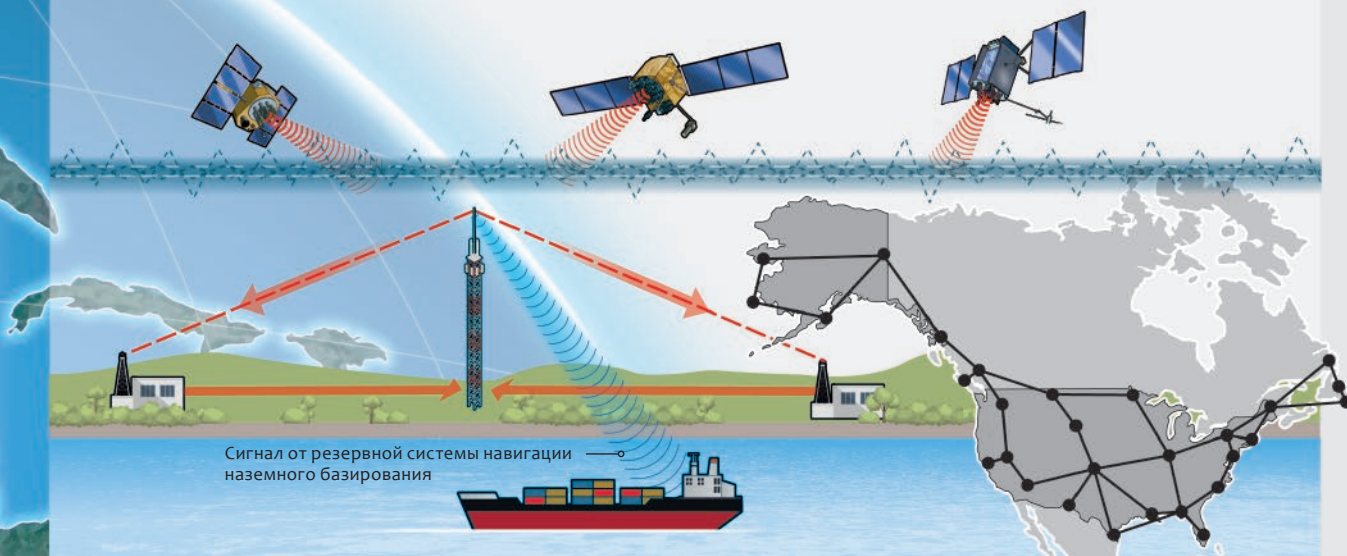
Спуфинг

Каждый GPS-спутник отправляет уникальный код, идентифицирующий этот спутник. Находясь недалеко от GPS-приемника, хакер перехватывает отправленные коды, а затем ретранслирует их, медленно увеличивая мощность сигнала до тех пор, пока GPS-приемник не переключится на передатчик хакера, восприняв его в качестве истинного источника. Затем хакер посылает новые радиосигналы, которые вводят в заблуждение GPS-приемник или, например, капитана корабля; последний примет неверное решение, рассуждая следующим образом: поскольку судно якобы отклонилось от курса, необходимо его выровнять.



Резервная система навигации

Во многих странах существует резервная сеть, на которую некоторые приемники могут переключиться в случае хакерских атак или потери связи со спутниками GPS. Главные станции и антенны наземного базирования работают на низких частотах большой мощности, которые очень трудно заглушить или применить против них спуфинг. Приемник ловит сигналы от нескольких пар передатчиков резервной сети и определяет свои местоположение и время, хотя и с меньшей точностью, чем при использовании GPS. Резервная сеть будет эффективно работать, только если она покрывает страну или регион. На рисунке показан один из возможных вариантов покрытия территории США.



политикам, чтобы перейти от слов к делу, нужно ждать, пока произойдет что-нибудь ужасное? Но, как любят повторять специалисты по чрезвычайным ситуациям, Соединенные Штаты, похоже, всегда готовятся не к будущим, а к вчерашним катастрофам.

GPS-зависимость на руку хакерам

Современная система GPS представляет собой орбитальную спутниковую группировку (всего 31 спутник). Она известна под названием Navstar и эксплуатируется подразделениями Космического командования ВВС США. Для обеспечения точности GPS военные передают спутникам (когда они проходят строго над головой) до трех раз в день Всемирное координированное время (UTC) через сеть, состоящую из четырех наземных антенн, расположенных на территории от мыса Канаверал до атолла Кваджалейн. На каждом спутнике установлены атомные часы. Благодаря этому они показывают время с точностью менее 40 нс; при этом из-за корректировки, сделанной в соответствии с общей теорией относительности, часы спутников примерно на 45 мкс в день опережают время на часах, находящихся на поверхности Земли, а с учетом поправок в рамках специальной теории относительности они запаздывают на 7 мкс.

Каждый спутник непрерывно передает двоичный код на двух частотах: первая предназначена для военного назначения и требует ключ дешифрования, другая — для гражданских нужд и не зашифрована. Сигналы, передаваемые на обеих частотах, представляют собой пакеты данных, в которых закодированы время, координаты спутника в момент передачи сигнала, а также его орбита и координаты остальных спутников орбитальной группировки. GPS-приемник, встроенный в смартфон, определяет свое текущее местоположение следующим образом: он вычисляет расстояние до спутника путем измерения задержки распространения сигнала от спутника до приемника. Для более точного определения своих координат и времени приемнику требуется принять как минимум четыре

сигнала. Вот почему навигационный гаджет теоретически может ошибиться, например, если пользователь окажется где-нибудь среди небоскребов Южного Манхэттена или на узких улочках Венеции. В США на ключевых объектах инфраструктуры устанавливают множество приемников GPS, которые синхронизируют работу этих объектов.

Хакеры научились глушить сигналы GPS при помощи шумовых помех, а кроме того — осуществлять спуфинговые атаки, то есть отправлять преднамеренно измененные, ложные сигналы (неправильное время или координаты приемника), что влечет за собой дезориентацию приемника во времени и пространстве. Как только одно из устройств допустило ошибку при определении времени, ошибочная информация распространится по сети и на другие устройства, в результате произойдет отключение всей системы целиком и приостановка ее деятельности.

Многие виды экономической деятельности сильно зависят от GPS-навигации, поскольку это самый точный — и к тому же бесплатный — способ измерения времени. До того момента, как появилась GPS, операторы электросетей определяли нагрузку на линиях электропередачи лишь с известной долей приближения, что приводило к неточностям. Но в наши дни GPS позволяет отслеживать состояние сетей ЛЭП и оптимизировать их работу в реальном времени. Когда-то в прежние времена финансовые рынки сверяли время по настенным часам. Из-за этого широко распространенными явлениями были подчас неточный хронометраж и несогласованность про-

ведения транзакций, причем даже после того, как биржевую торговлю компьютеризировали, потому что в те времена программное обеспечение всецело полагалось на часы, встроенные в компьютер, время на них выставляли вручную, ориентируясь на официальное время Национального института стандартов и технологий США (NIST), который занимается технологиями измерения и стандартизации времени. Однако современные финансовые системы (а они применяются и в терминалах для оплаты покупок, и на фондовом рынке, и много

Система eLogan способна обезвреживать хакерские атаки (глушение и спуфинг): с этой целью она генерирует низкочастотный радиосигнал, который по мощности намного превосходит ультравысокую частоту сигнала GPS, в результате чего его практически нельзя подавить

где еще) используют GPS для отслеживания времени и для синхронизации совершения операций, тем самым избавляя розничных продавцов от необходимости каждый раз отсылать информацию о продажах в конце рабочего дня. Кроме того, GPS позволяет поддерживать глобальную торговлю на УВЧ-волнах — а это характерная примета нашего времени.

Мобильные сети тоже пользуются GPS, что позволяет им разбивать, передавать и заново собирать пакеты данных, а кроме того — передавать вызов с одной антенны на другую во время перемещения телефона. Электронные медицинские карты тоже привязаны ко времени, которое устанавливается по GPS. Используют GPS и телевизионные сети для того, чтобы доказать рекламодателям, что их рекламные ролики действительно демонстрировались в течение оплаченных интервалов времени. Всего во всем мире эксплуатируется более 2 млрд GPS-устройств.

Чрезмерная зависимость нашего общества от GPS — весьма заманчивая цель для хакеров. Словом, GPS все-таки уязвима и ее, конечно же, можно вывести из строя, в чем мы уже убедились. Осталось только понять: выберет ли хакер или группа хакеров спутниковую систему GPS в качестве орудия для проведения атаки. И в наше время, судя по всему, все чаще приходится отвечать утвердительно. «На сегодня у нас имеется множество фактов, подтверждающих, что спуфинг-атаки все-таки имели место и осуществлялись при поддержке некоторых государств», — говорит Хамфрис.

В марте 2019 г. некоммерческая аналитическая организация *Center for Advanced Defense Studies* (Центр перспективных исследований в области обороны), расположенная в Вашингтоне, округ Колумбия, выявила почти 10 тыс. атак с использованием спуфинга, источники которых локализовались в десяти регионах мира.

Наш журнал обратился за комментариями к правительственному советнику, который неоднократно предостерегал Конгресс США о хакерских атаках, к бывшему руководителю одного из подразделений министерства обороны и к бывшему федеральному чиновнику, который дал информацию для публикации, не раскрывая источника. По их мнению, организовать скоординированные атаки с использованием радиоэлектронного подавления (глушения) и спуфинга, направленные против различных систем, расположенных на территории США, совсем не сложно; стоит это недорого, но последствия катастрофические. «Можно атаковать по широкому фронту или же нанести точечный удар», — поясняет Дана Говард. Устройство для спуфинга стоит около \$5 тыс., а инструкции лежат в интернете в открытом доступе. Но от таких атак сложно защититься: «Даже относительно

простые меры, направленные на подавление спуфинга с целью предотвращения наиболее серьезных угроз, реализовать технически отнюдь не просто», — написал в журнале *Inside GNSS* один из разработчиков навигационной инфраструктуры в Европейской организации по безопасности воздушной навигации (*EUROCONTROL*) Герхард Берц (Gerhard Berz).

Распределенные атаки

Чтобы нанести мощный и скоординированный удар по инфраструктурным объектам США, достаточно взять десяток хакеров и, раздав им необходимые устройства, рассредоточить на территории страны. Как известно, 11 сентября 2001 г. ход истории изменили всего 19 боевиков «Аль-Каиды», проникших в США. Но в наше время для нанесения удара по GPS преступникам вовсе не нужно быть религиозными фанатиками, учиться управлять самолетом и убивать членов экипажа. Пожалуй, единственным средством, способным остановить атаки на систему GPS, остается международное право, ведь согласно его положениям радиоэлектронная борьба считается актом насилия, если она приведет к аналогичным последствиям. Таким образом, разрушение объектов гражданской инфраструктуры — это причина, способная вынудить Соединенные Штаты использовать военную силу в ответ. Именно возмездие со стороны США до сих пор, наверное, только и сдерживало хакеров.

Если преступникам все-таки удастся провести скоординированные атаки с использованием активного радиоэлектронного подавления и спуфинга, направленные против системы синхронизации GPS, то число жертв, скорее всего, будет меньше, чем 11 сентября 2001 г., однако масштабы разрушений могут оказаться более значительными. Вот, например, такой сценарий: представьте, что на светофорах, установленных на некоторых основных перекрестках в разных городах страны, вдруг везде одновременно загорелся зеленый свет. Для этого хакеру, засевшему где-нибудь поблизости в одном из соседних зданий, достаточно включить на своем ноутбуке программно определяемую радиосистему, затем провести сеанс связи на той же самой частоте, которую обычно использует глобальная навигационная спутниковая система, подсоединенная к светофорам. Во время сеанса связи хакер начнет передавать ложную информацию, представленную в двоичном коде, и зашумляющий код. Для того чтобы светофор поймал ложный сигнал, хакеру необходимо заблокировать механизм приема сигналов от спутника GPS, а потом вновь заставить принимать сигналы, на этот раз ложные. Если ложный сигнал окажется мощнее сигнала от GPS-спутника, то светофор, скорее всего, выберет первый из них. И теперь, получив

доступ к системе управления светофором, хакер спокойно сообщит ей неправильное время, в результате чего все светофоры включат зеленый свет для меридионального транспортного потока — и это произойдет до того момента, как загорится красный сигнал для потока машин, движущегося в широтном направлении.

Маленькая группа хакеров способна координировать атаки на разных перекрестках и в разных городах. А одному хакеру вполне по силам даже нарушить работу светофоров в целом городе. Как-то я рассказал об этом инспектору, отвечающему за работу светофоров Сан-Франциско (он принимал непосредственное участие в закупке шкафов электроавтоматики для светофоров). Оказалось, инспектор и не предполагал, что кто-то вообще сможет через *GPS*, подсоединенную к светофору, поменять настройки времени. Добавим, что *GPS*-модули *Garmin*, установленные в светофорах Сан-Франциско, не защищены от спуфинга; в технической спецификации производителя сказано следующее: в соответствии с требованиями Федеральной комиссии по связи США модуль *Garmin* должен принимать любые радиочастотные помехи, даже если они меняют данные на индикаторной панели этого модуля.

Однако не в каждом городе для регулирования дорожного движения в светофорах используется *GPS*. Правда, и альтернативные решения не всегда хороши. Менеджер по транспортным операциям в округе Сан-Антонио при Министерстве транспорта штата Техас Дейл Пича (Dale Picha) говорит, что в его округе избавляются от автономных *GPS*-приемников, установленных в шкафах электроавтоматики светофоров, предпочитая вместо них выставлять время по сотовой связи. Но и этот способ синхронизации не застрахован от спуфинга.

И к жертве несчастного случая скорая помощь, скорее всего, придет с опозданием, поскольку она выверяет время по *GPS*. Так, в 2016 г. из-за кратковременного сбоя несколько *GPS*-спутников передали неверное время. В результате практически у всех экстренных служб возникли проблемы с навигационным оборудованием и системами связи.

Мировая финансовая система — еще более заманчивая цель для хакеров. Среди болот штата Нью-Джерси, в трех с небольшим километрах от стадиона *MetLife Stadium* вовсю кипит торговля финансовыми инструментами в битах и байтах и ежедневно совершаются сделки на триллионы долларов. Здесь, в дата-центре транснациональной компании *Equinix*, услугами хостинга пользуются 49 бирж, включая Нью-Йоркскую фондовую биржу. Но если вдруг в *GPS*-приемнике, который синхронизирует время при проведении фондовых сделок, произойдет сбой, то, по словам

бывшего директора по глобальному развитию сетевых служб Нью-Йоркской фондовой биржи Эндрю Баха (Andrew F. Bach), данная поломка «приведет к дезорганизации торговли всего финансового сектора». Заметив сбой, компьютеры (а в настоящее время они, согласно данным холдинга *J.P. Morgan*, осуществляют 60% торговых операций), могут вдруг все как один поддаться на провокацию и избавиться от активов. «А если большие массы народа бегут к выходу, это значит, что перед нами настоящее бедствие, — говорит Эндрю Ло (Andrew Lo), профессор финансов из Школы менеджмента им. Альфреда Слоуна при Массачусетском технологическом институте. — Все это способно привести к обвалу [внезапному и резкому падению цен на акции] или даже к затяжному кризису». С ним согласен адъюнкт-профессор финансов из Школы бизнеса им. Эда Келли при Индианском университете Ноа Стоффман (Noah Stoffman): «Я легко могу себе представить, что сбой работы *GPS* будет иметь катастрофические последствия для экономики».

Итак, представим, что положение на торговых площадках Нью-Йорка стало шатким. И в этот самый момент хакеры, воспользовавшись уязвимыми местами аппаратуры, установленной практически на каждой электроподстанции, наносят еще один удар — по электрической сети в самом центре нашей страны. Возьмем, например, Фордемскую электрическую подстанцию в Лонгмонте, штат Колорадо, расположенную в 56 км к северу от Денвера; она управляется коммунальной компанией *Platte River Power Authority*. На Фордемской подстанции установлено стандартное оборудование, и хакеру несложно получить к нему доступ. А теперь представьте себе, что произойдет, если размещенные за ограждением высотой почти в 4 м неподалеку от одного из отелей *Holiday Inn Express* открытые распределительные устройства подстанции вдруг снизят электрическое напряжение, подаваемое по высоковольтным линиям от крупной газовой электростанции, расположенной в нескольких километрах от подстанции, до потребителя; при этом заметим, что в Лонгмонте и трех соседних городах насчитывается всего 348 тыс. потребителей — домохозяйств и корпоративных клиентов.

Все дело в том, что на этом объекте площадью примерно в 2,5 га установлены металлические ящики с устройствами измерения комплексной амплитуды (*PMU*), их назначение — контролировать состояние сети. Время для устройств *PMU* устанавливается с помощью *GPS*. Специалист по электрическим сетям США, инженер-электрик из Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории Джефф Дагл (Jeff Dagle) настаивает на том, что спуфинг-атака против устройств *PMU* не приведет к отключению электросети, поскольку

PMU не выступает критически важным элементом для работы сети. Но в отчете Национального института стандартов и технологий за сентябрь 2017 г. утверждается, что спуфинговая атака в отношении устройств *PMU* все-таки может привести к отключению генератора. В отчете говорится, что внезапная остановка нескольких крупных генераторов «создаст мгновенный дисбаланс спроса и предложения, а также приведет к нестабильности энергосистемы», то есть к возможному прекращению поставок электроэнергии. Тодду Хамфрису вместе с коллегами как раз удалось смоделировать в лабораторных условиях ситуацию, которая наступит в случае, если на устройствах *PMU* будет установлено некорректное время. И хотя *PMU*-устройства отделены от внешнего мира стеной, они все равно уязвимы перед спуфинговой атакой, которую способен организовать хакер, остановившийся в номере отеля где-нибудь на расстоянии полукилометра от этих устройств. Кстати, заметим, что всего в США имеется 55 тыс. подстанций.

Говард и Хамфрис предупредили руководителей всех инфраструктурных объектов об угрожающей со стороны хакеров опасности, поскольку, по их словам, мало кто из руководства знает об этих угрозах. Эффективные планы действий на случай возникновения чрезвычайной ситуации заготовлены у немногих (а некоторые из этих планов продолжают опять-таки опираться на *GPS*). В случае чрезвычайной ситуации, по словам Говарда, операторы электрических сетей «еще в течение нескольких часов не будут рассматривать *GPS* как возможный источник проблемы». Кроме того, продолжает Говард, «злоумышленникам еще в течение какого-то времени удастся успешно маскировать свои действия».

Если аварии в энергосистеме приносят ощутимые убытки и создают угрозы, то спуфинг-атака против самолета может стать прологом к катастрофе. По мнению Хамфриса и представителя *EUROCONTROL* Берца, организовать спуфинговую атаку сложно, но вполне возможно. Да, на борту летательных аппаратов *BBC* устанавливается так называемый антиспуфинговый модуль с избирательной настройкой. Однако в гражданской авиации он не используется, к тому же его размещение на борту строго ограничено законодательно. Мартин Лаут, который обучает авиадиспетчеров, сообщил мне, что у летчиков имеются и другие системы посадки. Основная — это используемая в аэропортах система инструментального захода на посадку, позволяющая наводить воздушное судно в горизонтальной и вертикальной плоскостях с учетом изменения дистанции до места посадки. Данная система работает на радиоволнах; ее создавали для обеспечения безопасности приземления, а не страховали от взлома, поэтому она

и не зашифрована. Следовательно, данная система не защищает от спуфинговых атак, и потому с помощью спуфинга можно заставить приемник самолета клюнуть на ложный сигнал.

Повысить устойчивость

В будущем наше общество станет, пожалуй, все больше и больше полагаться на *GPS*. Интернет вещей с поддержкой *5G* также будет сильно зависеть от *GPS*, ведь устройствам для синхронизации взаимодействия между собой и с сетью требуется знать точное время. То же самое касается и «виртуального Зазеркалья», то есть цифрового представления реального мира, которое компьютеры должны будут создавать для искусственного интеллекта и приложений, использующих дополненную реальность.

Министерство внутренней безопасности США признало нависшую угрозу. Однако действиями (или бездействием) этого министерства, направленными на нейтрализацию этой угрозы, довольны не все. По мнению директора Отдела позиционирования, навигации и синхронизации при Министерстве внутренней безопасности Джеймса Платта (James Platt), министерство совместно с *NIST* в настоящий момент устанавливает различные уровни безопасности для разных типов приемников. Кроме того, министерство проводит ежегодные учения, которые позволяют производителям оборудования проверять выпускаемую компьютерную технику и решать, способна ли она противостоять атакам хакеров. Информация о результатах этих проверок закрыта, однако консультант Логан Скотт (Logan Scott), который посвятил системе *GPS* уже 40 лет, утверждает, что «в условиях активных помех и спуфинга многие приемные устройства работают не очень хорошо».

Борьба со спуфингом — развивающаяся область исследований. За последние несколько лет по этой теме были опубликованы сотни статей. Например, специалисты установили, что во время спуфинговой атаки след истинного сигнала *GPS* в приемнике выглядит как искажение. Специальное оборудование способно отследить такие искажения и в случае их обнаружения подать сигнал тревоги. Но преступники научились устранять подобные искажения с помощью генерирования сигнала. «Стопроцентной защиты не существует», — считает Хамфрис. И все же, по мнению Хамфриса, стоит заставить хакера дорого заплатить за свои преступные деяния, и здесь спецсредства защиты от спуфинга как нельзя кстати. Правда, преступники способны их нейтрализовать, вооружившись необходимым оборудованием. Итак, средства защиты и хакерские атаки находятся в постоянном противоборстве, которое происходит в радиочастотном диапазоне.

Эта жесткая борьба прекратится только тогда, когда США создадут резервную систему измерения времени, подобную той, что существует в других странах. В декабре 2018 г. президент Дональд Трамп подписал закон об устойчивости и безопасности временной синхронизации, который предписывает Министерству транспорта США создать к 2020 г. «наземную, устойчивую и надежную альтернативную систему измерения времени и синхронизации». Но ни этот закон, ни президент не профинансировали данное начинание.

Говард и прочие критики полагают, что упомянутый закон служит лишь свежим примером неадекватных действий правительства США. В 2001 г. Министерство внутренней безопасности выпустило отчет, в котором говорилось об уязвимости GPS. И тогда президент Джордж Буш поручил Министерству внутренней безопасности США и Министерству транспорта создать резервную систему к 2004 г. В 2015 г. заместитель министра обороны и заместитель министра транспорта сообщили конгрессу, что они станут совместно развивать систему *eLoran* (модернизированную систему дальней навигации), которая соответствует требованиям закона об устойчивости и безопасности временной синхронизации 2018 г. Несколько лет назад конгресс профинансировал пилотную версию *eLoran*, но не было потрачено ни цента. В письме от 8 мая Адам Салливан (Adam Sullivan), помощник министра транспорта по связям с государственными органами, сообщил Питеру Де Фазио (Peter DeFazio), председателю Комитета Палаты представителей по транспорту и инфраструктуре США, о том, что к концу 2019 г. министерство «планирует провести полномасштабные испытания технологий <...>, призванных обеспечить резервное предоставление услуг [координаты, навигация и временная синхронизация] для особо важной инфраструктуры». И уже в сентябре — то есть через неделю после того, как сенаторы Тед Круз (Ted Cruz) из Техаса и Эд Марки (Ed Markey) из Массачусетса решили узнать у министра транспорта причины, по которым происходит задержка, — Министерство транспорта США объявило об условиях подряда.

Система *eLoran* способна обезвреживать хакерские атаки (глушение и спуфинг). С этой целью она генерирует низкочастотный радиосигнал, который по мощности намного превосходит ультравысокую частоту сигнала GPS, в результате чего его практически нельзя подавить. По мнению Говарда и члена Палаты представителей от штата Калифорния Джона Гараменди (John Garamendi), в рамках развития системы *eLoran* предусмотрено строительство на принципах государственно-частного партнерства около двух десятков гигантских антенн, покрывающих всю территорию страны. Добавим, что Говард и Гараменди в свое время

обращались к нескольким администрациям США, побуждая их к действиям. По некоторым данным, ВВС США и Пентагон изучают возможность использования также и других потенциальных резервных систем. Однако резервные системы, которые имеются в других странах, по сути считаются модификациями *eLoran*.

Но даже если начать работы с завтрашнего дня, то и в этом случае для создания *eLoran* потребуются годы. Еще больше времени пройдет, прежде чем новые устройства и приемники будут разработаны, изготовлены и доставлены клиентам. «В лучшем случае года четыре», — полагает Франк Прауцш (Frank Prautzsch), бывший директор сетевых систем в *Raytheon*, принимавший участие также в создании космических систем в *Hughes Space and Communications*.

Существует еще одно решение проблемы: снабдить спутниковые сигналы GPS цифровой подписью, которая подтверждала бы подлинность передаваемых данных, и разместить криптографическое оборудование для поддержки открытого и секретного ключей. Однако сигнал, посылаемый спутниками, не может быть изменен. По словам официального представителя ВВС, у командования нет никаких планов по установке бортовой системы цифровых подписей на спутниках следующего поколения, которые в настоящий момент разрабатываются на особо охраняемом объекте, принадлежащем корпорации *Lockheed Martin* и расположенном к западу от Денвера.

Несмотря на все это, Платт уверен, что ключевые объекты инфраструктуры выстоят под ударами хакеров. «Мы решили поговорить с представителями промышленности и выяснить, есть ли у них стратегии, призванные смягчить последствия хакерских атак», — сказал Платт. На что Говард добавил: «А вы предложите отключить GPS на 24 часа, и посмотрим, что получится». ■

Перевод: И.В. Ногаев

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Above Us Only Stars: Exposing GPS Spoofing in Russia and Syria. C4ADS; March 26, 2019.
- Dual-Antenna GNSS Spoofing Detection Method Based on Doppler Frequency Difference of Arrival. Li He et al. in GPS Solutions, Vol. 23, Article No. 78; July 2019.



ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛ

Научная Россия



Взгляд на науку
с пристрастием

Актуальная информация о науке и технике в России и в мире
Открытия в разных областях фундаментальной и прикладной науки
Новости из научных центров и вузов страны и мира

scientificrussia.ru



ИЮЛЬ 1970

О нервах и поведении. «Чарлз Дарвин утверждал, что поскольку человек произошел от низших животных, его поведение должно иметь параллели в поведении низших форм. Радикальная догадка Дарвина стимулировала исследования поведения животных, открывающая путь для экспериментов, которые были невозможны на людях. Раки, пиявки, различные виды насекомых и улитки имеют огромное преимущество потому, что их нервная система состоит из относительно небольшого количества нервных клеток (возможно, 10 тыс. или 100 тыс. по сравнению с триллионом или около того у высших животных). На этих животных на уровне отдельных клеток можно отслеживать не только сенсорную информацию, поступающую в нервную систему, и идеомоторные акты, исходящие из нее, но и общую последовательность событий, лежащих в основе поведенческого ответа». — Эрик Кандел (Eric Kandel).

Примечание: Кандел получил Нобелевскую премию по медицине в 2000 г.



ИЮЛЬ 1920

Ценность минерала. Асбест — дикий, мистический и парадоксальный минерал, по всем признакам подходящий на твердую породу и в то же время состоящий из подобных шелку волокон, настолько прочных, что миллионы лет охлаждения, отвердевания

и растрескивания Земли не разорвали эти тонкие нити. Не поддающееся оценке практическое значение асбеста обусловлено тем, что он обладает беспрецедентным сочетанием износостойчивости и теплоизоляционных свойств. Совершенствованные теплоизоляции и ее применение на тысячах



1870 г.: рисунок гостиницы «Гранд Пасифик» в Чикаго. Строительство было закончено в 1873 г. примерно в таком виде. Однако в 1895 г. потребности быстро растущего города затмили нужду в этом когда-то впечатляющем здании и большая его часть была снесена.

американских электростанций позволяет экономить электроэнергию и топливо на миллионы долларов ежегодно.



ИЮЛЬ 1870

Споры о Дарвине. Аббат Муаньо — научный авторитет и правоверный католик, и последнее придает особое значение его публикации: «Ввиду сложившегося в некоторых кругах антагонизма научным исследованиям как противоречащим вере мнение того, кто

настолько консервативно исповедует веру, представляет особый интерес. Позицию, на которой ученые-христиане могут чувствовать себя в безопасности, блестяще изложил профессор Дана в его недавней лекции, в которой рассматривался предмет теории Дарвина. В ходе своего выступления он заявил, что вера в теорию эволюции не есть атеизм, что научные факты четко указывают на существование некоего плана развития, а книга Дарвина представляет собой большую ценность. И пусть никто не боится научных исследований».



ПРАЗДНУЕМ
175
ЛЕТ

Монументальные сооружения

Как результат социального согласия возникают памятники людям, событиям, а также гражданским, религиозным или коммерческим организациям. Очевидно, человек отчасти движим самолюбием, заполняя планету этими (иногда очень красивыми) монументальными сооружениями. Верно и то, что передовая инженерная мысль призвана наглядно продемонстрировать искусственность строителя (и владельца), хотя следует отметить также, что накопление средств для их строительства слишком часто — результат общественного неравенства, или даже порой сами они — творения рук людей, прозябавших в рабстве. Так или иначе, каждое новое сооружение в конце концов остается в тени чего-нибудь еще более великолепного или технически сложного.

1997 г.: строительство одной из башен-близнецов Петронас в Куала-Лумпуре (Малайзия). Башни были самыми высокими в мире с момента их открытия в 1998 г. до 2004 г.

Acting Editor in Chief:

Copy Director:

Creative Director:

Managing Editor:

Chief Features Editor:

Chief News Editor:

Chief Opinion Editor:

Senior Editors:

Associate Editors:

Curtis Brainard
 Maria-Christina Keller
 Michael Mraz
 Ricki L. Rusting
 Seth Fletcher
 Dean Visser
 Michael D. Lemonick
 Mark Fischetti, Josh Fischman, Clara Moskowitz,
 Madhusree Mukerjee, Jen Schwartz, Kate Wong
 Gary Stix, Lee Billings, Sophie Bushwick,
 Andrea Thompson, Tanya Lewis, Sarah Lewin Frasier

Editors Emeriti:

Contributing Editors: Gareth Cook, Lydia Denworth, Ferris Jabr, Anna Kuchment,
 Robin Lloyd, Melinda Wenner Moyer, George Musser, Ricki L. Rusting

Art Contributors: Edward Bell, Zoë Christie, Lawrence R. Gendron, Nick Higgins

Art Director: Jason Mischka

Senior Graphics Editor: Jen Christiansen

President: Dean Sanderson

Executive Vice President: Michael Florek

Vice President, Commercial: Andrew Douglas

Publisher and Vice President: Jeremy A. Abbate

© 2020 by Scientific American, Inc.

В мире науки

Оформить подписку на журнал «В мире науки» можно:

в почтовых отделениях по каталогам:

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

по РФ и странам СНГ:

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

Читайте в следующем номере

СПЕЦИАЛЬНЫЙ РЕПОРТАЖ

Пандемия COVID-19

Каково происхождение вируса? Как скорее получить лекарство? Что чувствуют медики на передовой борьбы с пандемией? Как проходят поиски вакцины? Что будет дальше?

Внутри коронавируса

«Интимная жизнь» патогена, поразившего жителей всего земного шара.

Рассказы умирающего мозга

Близкое соприкосновение со смертью может оставить неизгладимое впечатление в сознании выжившего — и рассказать о том, как мозг работает в экстремальных условиях.

Удивительная история пальцев

Недавние ископаемые находки указывают на то, что пальцы передних конечностей возникли задолго до того, как позвоночные выбрались из воды и колонизировали сушу.

Как земледельцы завоевали Европу

Когда земледельцы встретились с охотниками-собирающими, вероятно, сформировалась нарушившая равновесие иерархия.



Самые темные частицы

Проводится эксперимент, направленный на поиск нового типа нейтрино, который мог бы стать ключом к темному сектору Вселенной.

Лечение без взвешивания

Зацикленность на потере веса не делает людей здоровее. Некоторые врачи пробуют другой подход.



Ваш прогноз на 28 дней

Метеорологам все лучше удается предсказывать наступление жары, холода, влажности и засухи на четыре недели вперед.



ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛ

Научная Россия



*Художница Екатерина Лебедева
«Разговор с Капицей»*



Взгляд на науку с пристрастием

Актуальная информация
о науке и технике в России
и в мире

Открытия в разных
областях фундаментальной
и прикладной науки

Новости из научных
центров и вузов страны
и мира

scientificrussia.ru