

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Ежемесячный
научно-информационный
журнал

www.sci-ru.org

10 2021

12+

НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА БОЛЕЗНЬ АЛЬЦГЕЙМЕРА // АТОМНЫЙ ПРОРЫВ В СИБИРИ

ПОЧЕМУ ЖИВОТНЫЕ ИГРАЮТ

Правила игры для собак,
обезьян и слонов

ISSN 0208-0621



9 770208 062001 >





4



90

СОДЕРЖАНИЕ

Октябрь 2021

Темы номера

ПОВЕДЕНИЕ ЖИВОТНЫХ

Почему животные играют?

Кейтлин О'Коннелл

Игры способствуют физическому и когнитивному развитию животных и помогают им совершенствовать навыки, необходимые для выживания и размножения

НАУКИ О ЗДОРОВЬЕ

Влияние пандемии COVID-19 на психику

Клаудиа Уоллис

Уровень депрессии и тревожности в обществе оказался значительно выше, чем ожидалось, особенно среди молодежи

ЭПИДЕМИОЛОГИЯ

Год, когда исчез грипп

Кэти Пик

Меры по сдерживанию распространения COVID-19 привели к беспрецедентному снижению заболеваемости гриппом

ЗДРАВООХРАНЕНИЕ

Момент надежды

Робин Ллойд

После года царствования болезни и смерти человечество ищет спасения от COVID-19 в массовой вакцинации

4

18

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

«Прорыв» в атомной энергетике

Анастасия Рогачева

В Северске продолжается строительство первого в мире энергоблока нового поколения в рамках проекта «Прорыв». О требованиях безопасности к АЭС будущего рассказывает академик **Леонид Большов**

14



28

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Сложнейшее изобретение человечества

Янина Хужина

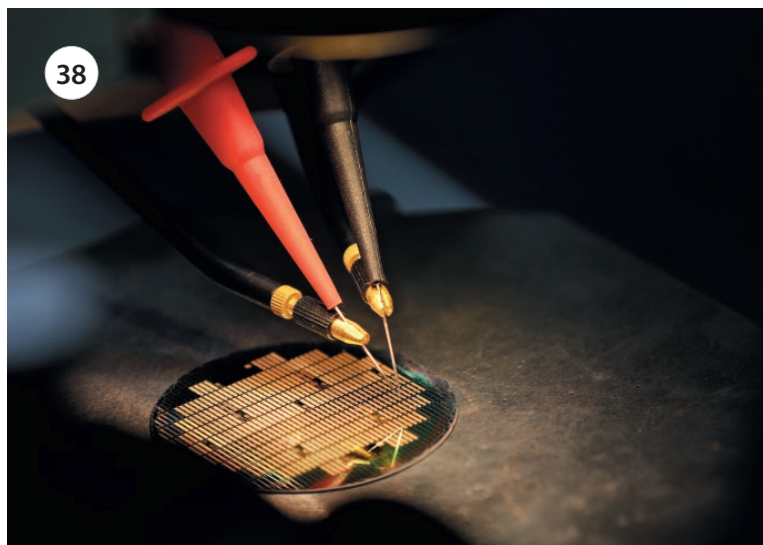
Почему самые сложные изобретения в мире связаны именно с микроэлектроникой? Отвечает начальник отдела прикладных нанотехнологий Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий **Максим Занавескин**

16

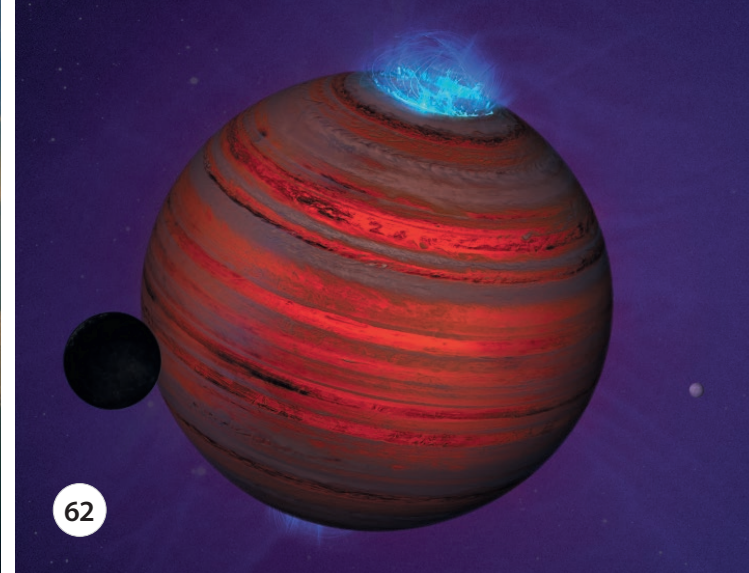
38



80



38



ОПТИКА АТМОСФЕРЫ

Полеты над Арктикой: как российские ученые исследуют атмосферу

Янина Хужина

Директор Института оптики атмосферы СО РАН Игорь Пташник — о работе уникального научно-исследовательского самолета-лаборатории «Оптик»

46

ПОЧВОВЕДЕНИЕ

Почва как основа жизни

Янина Хужина

Почва определяет человеческую жизнь во многих аспектах. Между тем единая систематика и классификация почв — до сих пор вопрос будущего. На эти и другие темы рассуждает член-корреспондент РАН Вячеслав Рожков

54

АСТРОНОМИЯ

Не совсем звезды

Кейтлин Аллерс

Коричневые карлики располагаются где-то посередине между звездами и планетами и поэтому способны помочь нам разгадать загадки и тех и других

62

НЕВРОЛОГИЯ

Новое понимание болезни Альцгеймера 72

Джейсон Ульрих и Дэвид Холцман

Микроглия стала перспективным объектом для исследователей, занимающихся поиском способов лечения этого нейродегенеративного заболевания

НЕЙРОБИОЛОГИЯ

Заикающийся мозг

80

Лидия Дэнурт

Раньше в этом расстройстве речи обвиняли самого человека или его родителей, но теперь известно, что оно обусловлено особенностями генов и нервных связей

КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Квантовое будущее химии

90

Жаннетт Гарсиа

Квантовые компьютеры выведут молекулярное моделирование на новый уровень точности, уменьшив зависимость ученого от счастливого случая

Разделы

От редакции

3

50, 100, 150 лет тому назад

96



В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Наши партнеры:



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



РОСАТОМ



Сибирское отделение РАН



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



Учредитель и издатель:

Некоммерческое партнерство «Международное партнерство
распространения научных знаний»

Главный редактор:

В.А. Садовничий

Главный научный консультант:

президент РАН акад. А.М. Сергеев

Ответственный секретарь:

О.Л. Беленицкая

Шеф-редактор иностранных материалов:

А.Ю. Мостинская

Выпускающий редактор иностранных материалов:

В.Д. Ардаматская

Зав. отделом российских материалов:

О.Л. Беленицкая

Выпускающий редактор:

М.А. Янушкевич

Обозреватели:

В.С. Губарев, В.Ю. Чумаков

Администратор редакции:

Э.Х. Мусина

Научные консультанты:

акад. Л.А. Большов; к.ф.-м.н. М.Л. Занавескин; д.ф.-м.н. И.В. Пташник;

член-корр РАН В.А. Рожков; к.ф.-м.н. В.Г. Сурдин

Над номером работали:

М.С. Багоцкая, А.П. Кузнецов, А.И. Прокопенко, А.И. Рогачева, Я.Р. Хужина,

Н.Н. Шафрановская, С.Э. Шафрановский, А.В. Щеглов

Дизайнер:

Д.А. Гранков

Верстка:

А.Р. Гукасян

Корректора:

М.А. Янушкевич

Фотографы:

Н.Н. Малахин, Н.А. Мохначев

Директор НП «Международное партнерство распространения научных знаний»:

А.Ш. Геворгян

Заместитель директора НП «Международное партнерство распространения научных знаний»:

В.К. Малахина

Финансовый директор:

Л.И. Гапоненко

Главный бухгалтер:

Ю.В. 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:



ПАО «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 № 0872

© В МИРЕ НАУКИ. Журнал зарегистрирован в Комитете РФ по печати. Свидетельство ПИ
№ ФС77-43636 от 18 января 2011 г.

Тираж: 12 500 экземпляров. Цена договорная

Авторские права НП «Международное партнерство распространения научных знаний».

© Все права защищены. Некоторые из материалов данного номера были ранее опубликованы Scientific American или его аффилированными лицами и используются по лицензии Scientific American. Перепечатка текстов и иллюстраций только с письменного согласия редакции. При цитировании ссылка на «В мире науки» обязательна. Редакция не всегда разделяет точку зрения авторов и не несет ответственности за содержание рекламных материалов. Рукописи не рецензируются и не возвращаются.

Торговая марка Scientific American, ее текст и шрифтовое оформление являются исключительной собственностью Scientific American, Inc. и использованы здесь в соответствии с лицензионным договором.



Серьезная игра

Среди ученых не утихают дискуссии о том, какие факторы больше влияют на глобальное изменение климата — природные или антропогенные. Ряд материалов этого номера позволяют взглянуть на эти проблемы с разных точек зрения.

В прошлом году состоялась уникальная экспедиция: единственный в нашей стране постоянно действующий научно-исследовательский самолет «Оптик» совершил облет всех шести морей российской Арктики. Цель — измерение концентрации газов, радиационных параметров, характеристик поверхности морей и т.д. О результатах исследований читайте в интервью с директором Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН И.В. Пташником «Полеты над Арктикой: как российские ученые исследуют атмосферу».

Мы привыкли воспринимать почву как должное. Между тем без нее на Земле не было бы ни растений, ни животных, ни людей. В статье «Почва как основа жизни» член-корреспондент РАН В.А. Рожков объясняет, как почва влияет на атмосферу планеты, как она возникла, как почвы и леса реагируют на глобальное изменение климата.

Вопрос экологически чистой энергетики сегодня актуален как никогда. Насколько безопасно делать ставку на атомные станции? Все помнят о Чернобыльской АЭС и «Фукусиме-1». Академик Л.А. Большов рассказывает о выводах, которые были сделаны после этих аварий, о требованиях к безопасности и о строительстве первого в мире энергоблока нового поколения, который воплощает атомную энергетику будущего — экологичную и беспрецедентно безопасную.

На обложку этого номера вынесена иллюстрация к статье «Почему животные играют?». Ее автор описывает поведение слонов в дикой природе. Молодые слоны играют у водоемов точно так же, как наши дети, а взрослые так же, как и мы, всегда готовы вмешаться, если игра становится рискованной. Хорошие игры приносят пользу как животным, так и людям: они укрепляют здоровье, способствуют сотрудничеству и развитию креативности. «Стоит ли отказываться от забав, сулящих нам столько благ?» — заключает автор. ■

Редакция журнала «В мире науки / Scientific American»

ПОВЕДЕНИЕ ЖИВОТНЫХ

ПОЧЕМУ ЖИВОТНЫЕ МИГРИРУЮТ?

Кейтлин О'Коннелл



Игры способствуют физическому
и когнитивному развитию животных
и помогают им совершенствовать
навыки, необходимые для
выживания и размножения



ОБ АВТОРЕ

Кейтлин О’Коннелл (Caitlin O’Connell) — этолог из Гарвардской медицинской школы, изучает поведение и коммуникацию слонов. Последняя книга исследовательницы — «Дикие ритуалы: десять уроков об отношениях, общности и нас самих, которые могут преподать нам животные» (*Wild Rituals: 10 Lessons Animals Can Teach Us about Connection, Community, and Ourselves*, 2021).



К

огда я заметила семейство слонов у южного края леса, над национальным парком Этоша в Намибии сгущались вечерние сумерки. Я пристально вглядывалась в горизонт со смотровой вышки у водопоя Мушара, с которой я и мои коллеги долгие годы наблюдаем за поведением нескольких стад диких слонов. В течение предшествующих дней сильный ветер удерживал животных от посещения водопоя: он мешал разным семейным группам этих великанов отслеживать взаимные перемещения с помощью запахов и голосовых сигналов. Сегодня, когда ветер стих, на горизонте наконец-то появилось одно из стад.

Судя по множеству заданных вверх и приносящихся к воздуху хоботов, животным явно не терпелось выйти из зарослей и устремиться к воде. Особенно рьяно «рвались в бой» молодые самцы. Им хотелось не только пить, но и вдоволь побегать по открытой местности. С наступлением зимы саванна высыхает и, чтобы обеспечить себя кормом, слонам приходится удаляться от водоема на довольно значительное расстояние. Может пройти несколько дней, прежде чем животные смогут вернуться к источнику воды и встретиться здесь с сородичами.

Но покидать лес слоны явно не спешили. Причина их нерешительности вскоре стала мне понятна. В лесу, раскинувшись на юго-востоке, я заметила еще одну семейную группу слонов, направлявшуюся в нашу сторону. Взрослые слоники первого стада явно забеспокоились. Они стояли, широко расставив ноги, выставив вперед уши и приносясь к встречному ветру, готовясь дать достойный отпор любому противнику. Покидая безопасный лес, стадо слонов рискует столкнуться не только с хищниками, но и с группой слонов более

высокого социального ранга, что может завершиться агрессивным взаимодействием. Но для слонят чужое семейство слонов в первую очередь означает возможность познакомиться и вдоволь наиграться со сверстниками. Наконец, тщательно оценив ситуацию, слониха — лидер (матриарх) первого стада одобрительным ревом и хлопком ушей разрешает своим подчиненным тронуться с места и возобновить путешествие к водопою.

Вечерние сумерки — мое любимое время суток в тропические зимние месяцы: нагретый за день воздух быстро остывает, и солнце, низко опустившись к горизонту, окрашивает слонов в лучащийся розовый цвет. Мы с коллегами стоим на смотровой башне, потягивая прохладительный напиток и вглядываясь с помощью биноклей в далекий горизонт в надежде увидеть какое-нибудь из наших любимых слоновьих стад. Присматриваясь к слонам во время их визитов к водопою, я каждый день узнаю о них что-нибудь новое — особенно об игровом поведении этих гигантов.

Наблюдая, как слоны моих любимых семейств резвятся на закате у источника



Игры развивают навыки выживания: слоненок, приглашающий сверстника поиграть, обычно касается хоботом его телени (внизу справа). «Перетолкашки» — важная форма игрового поведения, способствующая развитию силы и освоению новых защитных навыков в безопасной ситуации (слева). Чтобы дать слоненку возможность потренировать свои боевые навыки, взрослый слон может опуститься на колени (вверху справа).

воды, я поняла, какое огромное значение имеют игры для правильного развития слонят и формирования взаимоотношений между взрослыми членами группы. Благодаря этим наблюдениям, пусть подчас хаотичным, мне захотелось глубже изучить игровое поведение животных и узнать, какие оно может сулить преимущества — и не только слонам, но и всем прочим социальным существам, включая людей. Оказалось, что игры, как и другие формы взаимодействия животных, регулируются определенными правилами и что игровая активность — существенный фактор развития физических и когнитивных способностей, необходимых животным для выживания и размножения в зрелом возрасте.

Правила и инструкции

Обычно мы относимся к играм как к форме активности, которая доставляет нам удовольствие и которой люди или животные

предаются на досуге, то есть в то время, когда они не заняты освоением жизненно важных навыков (например, связанных с охотой, спариванием или избеганием опасности). Но, хотя игры и в самом деле доставляют радость и их непосредственным участникам, и тем, кто за ними наблюдает, игровое поведение прежде всего сформировалось в процессе эволюции как ритуализованная форма поведения, обеспечивающая животным возможность для освоения и совершенствования навыков, без которых им будет не обойтись в жизни, когда они станут взрослыми.

Участие в играх позволяет животным поэкспериментировать с новыми формами поведения в безопасной ситуации, не рискуя вызвать неблагоприятные последствия. Неписанный кодекс поведения, связанный с игрой, дает животным возможность изучить самые разные результаты своих действий.

Животные усваивают правила участия в играх с самого раннего возраста. У собак универсальное приглашение к игре — «поклон» (слева). Детеныши хищников (например, львята) используют игры для освоения охотничьих навыков (справа).



Животные усваивают правила участия в играх в очень раннем возрасте. У собак «поклон» — универсальное приглашение к игре, обычно вызывающее у сородича-адресата такую же реакцию: разведение передних лап в стороны, припадание на них к земле и последующее преследование и легкое покусывание друг друга. Шимпанзе и гориллы склоняют сородичей к играм, оскаливая верхние и нижние зубы, что, по мнению приматологов, соответствует человеческому смеху.

Когда молодой самец слона хочет поиграть со сверстником одного с ним пола, в знак приглашения он обычно поднимает вверх хобот, а затем касается им головы другого слоненка. У взрослых слонов это действие — знак доминирования, а у слонят оно безотказно приводит к энергичной дружеской потасовке. Игровые баталии слонят включают самые разные действия — от легких толчков туловищем до сильных ударов головами и попыток столкнуть друг друга с места с крепко переплетенными хоботами и скрещенными бивнями. У совсем маленьких слонят такие забавы обычно длятся от нескольких секунд до нескольких минут, а у слонят-подростков и молодых взрослых слонов они могут продолжаться гораздо дольше. Благодаря игровым поединкам молодые самцы получают возможность проверить свои боевые способности, чтобы

впоследствии, по достижении половой зрелости и надлежащего гормонального статуса в возрасте примерно 25 лет, успешно конкурировать с другими самцами за самок.

В чрезмерно игривом настроении молодые самцы слонов иногда отваживаются пренебречь материнской опекой и, удалившись от нее на значительное расстояние, попытаться завязать игру с каким-нибудь дальним родственником. Если отвага заводит слоненка слишком далеко или если партнер по игре начинает вести себя грубо, храбрец вдруг теряет все свое мужество и, хлопая ушами и размахивая во все стороны хоботом, со всех ног мчится обратно к мамаше.

Иногда за игровыми поединками малышей надзирают их старшие сестры. Эти слонихи никогда не теряют бдительность и представляют собой важную часть сложной и обширной сети по уходу за слонятами. Так, они всегда готовы вмешаться в проблемную ситуацию, когда слоненок, например, нарушает невидимые границы социальной иерархии и получает болезненный шлепок от чересчур заботливой высокопоставленной мамашы.

Виды игр

Ученые, занимающиеся поведением животных, различают три основные категории игр. Во-первых, это социальные игры, представляющие собой любые забавы, в которых



участвуют несколько животных. Вторая категория, локомоторные игры, включает бег, ходьбу и прыжки — формы активности, способствующие развитию двигательных (моторных) навыков. У животных, становящихся жертвами хищников, локомоторные игры помогают совершенствовать тактику избегания врагов — как, например, высокие вертикальные прыжки у антилоп спрингбоков с непредсказуемым местом приземления животных. Слонам эти игры также помогают оттачивать навыки избегания хищников, а кроме того — совершенствовать стратегии убегания от чересчур агрессивного ухажера или соперника, решившего смертельно ранить конкурента. Напротив, львята и детеныши других хищников используют локомоторные игры для совершенствования охотничьих навыков. Отыскать сородича по следу или запаху, а затем побольнее укусить его в горло или загрибок — неплохая тренировка приемов, используемых хищниками для поимки жертв и их последующего умерщвления.

Многие виды животных, а также люди, с удовольствием затевают разнообразные локомоторные игры, имитирующие драки. Такие «драки понарошку» помогают испытать свои силы в безопасных ситуациях, когда все участники понимают правила игры и строго их соблюдают. Игровую борьбу у слонов можно уподобить армрестлингу

между хорошо знакомыми друг с другом любителями этой борьбы. Когда игры-драки становятся более изощренными и грубыми, они начинают скорее походить на поединки, характерные для восточных единоборств, позволяющие соперникам осваивать навыки и разрабатывать инновационные решения, которые во взрослой жизни помогут им избегать смертельных конфликтов. Кроме того, игры-драки помогают животным лучше узнавать своих сородичей, определять, кто из них заслуживает доверия, и осваивать столь важный в их жизни язык телодвижений.

Третья основная категория игр — манипуляционные игры, то есть игры животных с различными предметами. У слонов такими предметами могут служить палки или ветки, которые они исследуют, переносят с места на место или швыряют с помощью хобота. В неволе слоны с удовольствием играют с мячами и автомобильными камерами. В качестве игрового объекта может выступать и какое-нибудь животное (например, зебра или жираф), пробудившее у слона неодолимый инстинкт преследования. Однажды я стала свидетелем следующего забавного случая. Четырехлетний слоненок-самец по имени Лео решил показать своему младшему брату Лиаму, насколько забавной может быть погоня за другим существом. Когда жираф, выбранный Лео

в качестве «игрушки», пустился вскачь, растерянный Лиам, чтобы не отстать от брата, старательно заковылял следом за бегущими.

Две разновидности игр пока наблюдались учеными только у человекообразных приматов и людей. Одна из них, групповая игра, сочетает элементы социальных, локомоторных и манипуляционных игр. В качестве примеров можно привести такие командные игры, как футбол, хоккей, баскетбол и поло, которые получили официальное признание в качестве спортивных дисциплин с определенным набором правил (из представителей человекообразных приматов в эти игры играют лишь животные, выращенные людьми и содержащиеся в неволе). Другая разновидность игр, которая, по-

Игра — это ситуация, в которой можно безопасно экспериментировать с рисками. Цель игрока — не одержать в игре победу, а улучшить свои навыки, иногда даже ценой самоограничения

хоже, также характерна только для людей и человекообразных обезьян, — игры в «притворяшки». Дикий шимпанзе, например, может долго носить на руках небольшое бревно, воображая (притворяясь), что нянчит младенца. А маленькие дети нередко играют с воображаемыми игрушками или устанавливают незримые барьеры и всячески стараются, чтобы эти границы признали и взрослые люди.

Не просто забавы

Игра — это ситуация, когда безопасно экспериментировать с рисками. Когда львенку умышленно перестает сопротивляться игровому партнеру, он явно подвергает себя риску стать его жертвой. Марк Бекофф (Marc Bekoff) и его сотрудники из Колорадского университета в Боулдере предположили, что игры улучшают у животных координацию движений и чувство равновесия, а также совершенствуют их способность противостоять неожиданно возникающим стрессовым ситуациям. Цель игрока — не одержать в игре победу,

У диких слонов игры почти всегда — групповое занятие. Слоны обожают устраивать свалки — обрушиваться сверху на сверстников или даже лежащих взрослых слонов (если, конечно, те не против).

а улучшить свои навыки, иногда даже ценой самоограничения, то есть намеренного решения дать возможность партнеру одержать над собой верх.

Как только малыш начинает уставать от действий партнера по игре, роли могут радикальным образом измениться: теперь партнер начинает умышленно «давать слабинку», позволяя противнику взять над собой верх. Такая тактика самоограничения сопряжена со значительным риском и требует доверия к партнеру, но представляет собой весьма эффективный метод развития силы, проворства и ловкости. Кроме того, это отличный способ налаживания партнерских отношений. В стае играющих волков, выращенных Джимом и Джейми Датчерами (Jim & Jamie Dutcher) в горах Сотут в штате Айдахо, доминантный самец обычно намеренно замедлял бег, чтобы позволить одному из подчиненных самцов, состоявшему с ним в дружеских отношениях, догнать себя и потрепать за шкуру. Наблюдая за слонами, я не раз замечала, как детеныши постарше припадают к земле, чтобы дать возможность поиграть с ними совсем маленьким слонятам. Подобные ситуации сродни армрестлинговым поединкам между родственниками, когда старшие братья осознанно борются вполсилы, чтобы в схватке одержали победу их младшие, более слабые братья.

Еще один важный аспект игр, выводящий их участников из зоны комфорта и заставляющий их испытывать новые стратегии, — их нелепость, «глупость». Дурашливость, проявляющаяся в наших движениях, поведении и даже речи, помогает нам мыслить шире и изобретательнее. Ученые не раз наблюдали, как «глупые» игры помогали многим видам животных и даже роботам находить решение сложных задач. Когда ученый-компьютерщик Ход Липсон (Hod Lipson) из Колумбийского университета дал своим роботам, наделенным искусственным интеллектом, возможность немного подурачиться — потанцевать, совершая нелепые беспорядочные движения, оказалось, что впоследствии, столкнувшись с неожиданными проблемами, эти машины решали их гораздо быстрее и эффективнее, чем другие роботы. Так, благодаря информации о расположении предметов, полученной



в процессе хаотичного перемещения в пространстве, один из этих роботов смог избрести остроумный способ сохранения равновесия после потери им одной конечности. Данный эпизод можно сравнить с игрой морских львов в штормящем море, когда чудовищные волны вздымают животных на огромную высоту, а затем резко бросают вниз. Именно такие движения требуются этим морским зверям для того, чтобы избежать нападения белой акулы — главного врага морских львов, не считая китов косаток и людей.

Кроме всего прочего, игры укрепляют доверие. Этолог Томас Буньяр (Thomas Bugnag) и его сотрудники из Венского университета в Австрии наблюдали, как вороны искусно притворялись, что прячут в укром-

Даже в человеческих семьях старшие поколения иногда забывают взаимные обиды благодаря дружеским отношениям, установившимся во время игр между представителями младших поколений

ные места кусочки лакомств, а затем внимательно следили за последующими действиями своих сородичей; не исключено, что умные птицы пытаются таким образом выяснить, кто из их знакомых заслуживает доверия. Умение отличать конкурентов и соперников от потенциально надежных партнеров дает животным очевидные преимущества — независимо от того, хотят ли они завести союзников, создать коалицию внутри группы или восстановить разорванные отношения с сородичами.

Воссоединение семей

«Идут с юго-востока!» — во весь голос закричала я с наблюдательной башни Мушара, когда однажды во время сезона полевых исследований 2018 г. заметила на горизонте стадо слонов. Издали оно напоминало груду лежащих на лесной опушке розовато-серых валунов. Затем начался поиск идентификационных признаков, которые помогли бы нам опознать стадо, — отсутствующего бивня, разорванного внизу левого уха или V-образной выемки в верхней части

правого уха. Тот из нас, кому удавалось первым опознать появившееся на сцене семейство слонов, вечером получал дополнительную порцию выпивки.

Слонов, посетивших водопой в тот день, мы прозвали Актерами. В полевой сезон 2018 г. это было наше первое наблюдение за слонами, и мы с радостью увидели новое пополнение в семействе: у высокоранговой слонихи по имени Сьюзен, легко узнаваемой по кинжаловидному левому бивню, появился маленький слоненок — Лиам. А Вайнону, самку низкого ранга, сопровождала двухлетняя малышка Люси. Мы пристально следили за развитием конфликтных отношений между этими двумя слонихами в течение многих лет — особенно в 2012 г., когда каждая из них родила по малышу — Лео и Лизу соответственно.

Сьюзен безжалостно мучила Вайнону вплоть до конца ее беременности, агрессивно нападая на нее всякий раз, когда Вайнона приближалась к источнику, чтобы напиться воды. Напряженность отношений между самками достигла такой степени, что, когда Вайнона вместе со своей взрослой дочерью Эрин и всем их потомством покинула родное стадо на время родов, я стала беспокоиться за жизнь новорожденного детеныша Вайноны после ожидаемого воссоединения стада. Но я не исключала и возможности, что этого события не случится вовсе.

Мое предположение оправдалось: Вайнона со всем своим потомством покинула родное стадо и стала матриархом собственной группы слонов. Так продолжалось четыре года, пока в 2016 г. на свет не появилась новая малышка Вайноны, Люси. Это событие вновь изменило состав основного стада слонов, и, похоже, важнейшим фактором воссоединения семейства стала игра.

Старшая сестра Люси, Лиза, была робким слоненком, очень привязанным к матери и другим близким родственникам. Направляясь к водопою Мушара, Вайнона тщательно просчитывала время перемещений своего маленького семейства, чтобы избежать встречи с основным стадом. Как правило, группа Вайноны либо на один день опережала стадо Актеров, либо (чаще) на один день отставала от него. В тех редких случаях, когда оба стада сталкивались у водопоя, Лиза старалась не отбиваться от материнской группы, как бы сильно ей ни хотелось познакомиться со своими сверстниками из Большой семьи. И неудивительно: злая Сьюзен постоянно держалась поблизости,

готовая в любой момент ткнуть чужого слоненка в бок острым бивнем или шлепнуть его по спине тяжелым хоботом, ясно давая понять, что низкоранговым детенышам не пристало играть с королевскими отпрысками. А потому у слонят маленького, но неуклонно растущего семейства Вайноны почти не было возможности подружиться со сверстниками из Большой семьи.

Но маленькой Люси удалось в корне изменить ситуацию. С самого рождения этот слоненок отличался легким компанейским нравом. Не исключено, что врожденное любопытство Люси, выросшей в небольшой семье, подогревала возможность общения с многочисленными сородичами из крупного стада, с которыми она изредка сталкивалась на водопое. И, к великой досаде чванливой Сьюзен, Люси совсем не пугали предостережения ни ее самой, ни других высокоранговых слоних Большого семейства.

Двухлетняя Люси в совершенстве научилась бегать между ног взрослых слонов и держаться вне досягаемости их длинных хоботов, игнорируя попытки своей мамы обуздать ее пыл. Своим поведением она скорее напоминала сына Сьюзен Лео, который был ровесником ее старшей сестры Лизы. Когда мы определяли расстояния, на которых Лео держался на водопое от своей мамы, эти показатели всегда превосходили соответствующие показатели Лизы. Мы объяснили данный факт половой принадлежностью малышей и большей склонностью слонят-самцов отстаивать собственную независимость. Но поведение Люси показало нам, что все обстоит не так просто.

Люси проводила много времени на значительном расстоянии от своей матери и играла со слонятами матерей самых разных рангов. Когда однажды пришло время уходить с водопоя и два стада, как того требовали сложившиеся семейные отношения, должны были разойтись в разные стороны, Люси навсегда изменила эту традицию. Она так увлеклась игрой с другими слонятами, что разлучить ее с новыми друзьями Вайноне оказалось не по силам. А потому матери Люси пришлось отказаться от своих намерений.

Вместо того чтобы последовать по протоленному пути в направлении, противоположном маршруту стада Актеров, Вайнона, ее старшая дочь Эрин и все их потомство развернулись на 180 градусов и побрели следом за большим стадом: Вайнона не хотела навсегда потерять свою младшую дочь.

Ведь не было никакой гарантии, что чужие слонихи будут заботиться о Люси, а тем более кормить ее своим молоком, — это означало бы, что его может не хватить их собственным детенышам. Как бы там ни было, а к 2018 г., хотела того Вайнона или нет, ее семейство оказалось полностью реинтегрированным в стадо Актеров.

Всякий раз воспоминания об этих драматических событиях вызывают у меня улыбку. Ведь то же самое нередко происходит даже в человеческих семьях, когда старшие поколения забывают взаимные обиды и претензии благодаря дружеским отношениям, которые складываются между представителями младших поколений во время игр!

Об играх не стоит забывать и взрослым людям. Смех и улыбки способствуют сближению людей, укрепляют взаимоотношения и оказывают целебное воздействие. Кроме того, игры не отнимают у нас много времени. Если вам покажется, что вы слишком заняты по работе и совсем не расположены тратить время на глупые забавы, соберите волю в кулак и выкроите на это легкомысленное занятие час-другой из своего насыщенного рабочего графика. Результаты веселого, непринужденного общения наверняка заставят вас удивиться — будь то встреча с партнерами по бизнесу, с которыми у вас сложились непростые отношения, или посещение конфликтных родственников.

Игривость — неотъемлемое свойство высокоадаптивной и креативной природы человека. Я испытываю огромную благодарность своей любимой слонихе Вайноне и ее дочери Люси за то, что они еще раз показали мне, что игра всегда может научить нас чему-то новому и что ее уроки мы способны усваивать в любом возрасте. Хорошие игры могут принести огромную пользу. Они укрепляют отношения между людьми, воссоединяют распавшиеся семьи, помогают преодолевать трудности, укрепляют здоровье, способствуют сотрудничеству и развитию креативности. Стоит ли в таком случае отказываться от забав, сулящих нам столько благ? ■

Перевод: А.В. Щеглов

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Арнотт Г., Элвуд Р. Когда животные дерутся // ВМН, № 10, 2019.

ОБ АВТОРЕ

Клаудиа Уоллис (Claudia Wallis) — научная журналистка, лауреат премий, автор статей в *New York Times*, *Time*, *Fortune* и *New Republic*. Была выпускающим редактором *Scientific American Mind* и научным редактором *Time*.



Влияние пандемии *COVID-19* на психику

Уровень депрессии и тревожности в обществе оказался значительно выше, чем ожидалось, особенно среди молодежи

Клаудиа Уоллис

Не нужен никакой магический кристалл, чтобы предвидеть губительность пандемии *COVID-19* для нашей психики. Сама болезнь или страх заболеть, социальная изоляция, экономическая нестабильность, нарушение привычного уклада жизни, потеря близких — хорошо известные факторы риска депрессии и тревоги. Об этом же говорят и недавние исследования. Но они выявили и новые факты: неожиданно широкую распространенность психических расстройств; влияние на ситуацию средств массовой информации; особенно сильную уязвимость молодых людей.

В опубликованном в августе 2020 г. отчете американских Центров по контролю и профилактике заболеваний говорится о повышении втрое числа жалующихся на тревогу и вчетверо — на депрессию среди 5470 обследованных взрослых по сравнению с выборкой 2019 г. Аналогичным образом два проведенных в апреле общенациональных репрезентативных опроса (один — исследователями из Школы общественного здравоохранения Бостонского университета, другой — учеными из Университета Джонса Хопкинса) показывают, что распространенность депрессивных симптомов и «серьезных психологических расстройств» в три раза превышает показатели 2018 г. «Они втрое выше тех, что мы наблюдали после других

масштабных катастроф — теракта 11 сентября 2001 г. в Нью-Йорке, урагана «Катрина», беспорядков в Гонконге», — говорит Кэтрин Эттман (Catherine Ettman), ведущий научный сотрудник из Бостонского университета.

Как показали результаты исследований, в наибольшей степени это затронуло людей, уже имеющих проблемы с психическим здоровьем, граждан с низким уровнем дохода, представителей цветного населения, а также родных и близких тех, кто переболел *COVID-19* или умер от этого заболевания. По данным Эттман, в США самый значительный рост числа жалующихся на депрессию (в пять раз) наблюдался среди выходцев из стран Азии. В сопроводительном комментарии психиатр Рут Шим (Ruth Shim) высказывает мнение, что этот всплеск может быть следствием проявления расизма и оскорблений, связанных с тем, что пандемия зародилась в Китае.

Неожиданным открытием всех трех исследований стало то, что сильнее всего в психическом отношении страдают молодые люди. Согласно опросу американских Центров по контролю и профилактике заболеваний, 62,9% респондентов в возрасте от 18 до 24 лет сообщили о тревожном или депрессивном расстройстве, четверть — о том, что они стали чаще употреблять наркотики и алкоголь,

чтобы справиться со стрессом, и четверть заявили, что в прошедшие 30 дней «всерьез думали о самоубийстве». Молодежь оказалась также наиболее пострадавшей возрастной группой по данным необычного исследования, проведенного в три приема в режиме реального времени в период между серединой марта и серединой апреля, в рамках которого отслеживались случаи быстрого нарастания «острого дистресса» и депрессии. «Мы ожидали противоположных результатов, поскольку было известно, что большему риску заражения вирусом подвержены пожилые люди», — говорит соавтор этой работы Роксана Коэн Силвер (Roxane Cohen Silver), психолог из Калифорнийского университета в Ирвайне.

Как полагает Силвер, возможно, дело в том, что «у молодых людей в этот период больше проблем: выпускной год, экзамены в средней школе или колледже, свадьба и т.д. Все эти жизненные этапы пришлось корректировать, как и школьные и общественные связи, которые очень важны для молодежи».

Исследование Силвер, в котором участвовали 6,5 тыс. человек, указывает на один из основных факторов беспокойства людей всех возрастов: агрессивное поведение СМИ при освещении пандемии. Особенно негативно сказывается противоречивость данных. Силвер, изучавшая психологические последствия таких событий, как 11 сентября и взрывы на Бостонском марафоне 2013 г., считает, что неотступное отслеживание СМИ подобных инцидентов — несомненный фактор риска: «Если люди перерабатывают огромные потоки информации, они неизбежно сталкиваются с ситуациями дистресса и рассказывают о них. Это в свою очередь побуждает их сообщать о таких ситуациях в СМИ. Получается замкнутый круг, из которого сложно вырваться».

Силвер и другие ее коллеги, занимающиеся изучением последствий психологических травм, дают советы, как сохранить психическое равновесие в трудные времена. Один из них — стараться как можно реже обращаться к СМИ и избегать сенсационных сообщений.

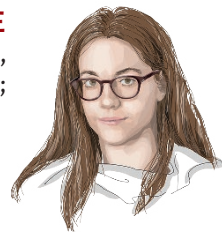
«Жизненно важно поддерживать социальные контакты через *Zoom*, телефон или другие не имеющие отношения к *COVID-19* средства связи, — говорит Джеймс Пеннебейкер (James Pennebaker), психолог из Техасского университета в Остине, исследующий влияние нынешней пандемии на психическое здоровье посредством анализа сообщений в соцсетях платформы *Reddit*. — По сравнению с другими катастрофическими ситуациями в период пандемии *COVID-19* люди оказались гораздо больше разобщены. Дефицит общения, отсутствие дружеского плеча собеседника, с которым можно поделиться общим горем, — все это мешает человеку приспособиться к новым жизненным реалиям. То, что происходит сегодня, не похоже на события 11 сентября или землетрясение, когда внезапно случается что-то грандиозное, а потом мы все довольно быстро возвращаемся к нормальной жизни». Еще несколько советов от Пеннебейкера — полноценный сон, физические упражнения, привычная диета. А еще — ведение дневника. «Как показывают результаты исследований, выплескивание эмоций на бумагу помогает справиться с ними и трезво оценить происходящее, — говорит он. — Если вас слишком тревожит *COVID-19*, попробуйте написать об этом».

Перевод: С.Э. Шафрановский



ОБ АВТОРЕ

Кэти Пик (Katie Peek) — научный журналист и дизайнер, специализирующийся в области визуализации данных; внештатный иллюстратор *Scientific American*.



ЭПИДЕМИОЛОГИЯ

Год, когда исчез грипп

Меры по сдерживанию распространения *COVID-19* привели к беспрецедентному снижению заболеваемости гриппом

Кэти Пик

Параллельно разворачиванию пандемии *COVID-19* в мире шел другой процесс — снижение заболеваемости гриппом. По данным ВОЗ, его уровень по всему земному шару упал до исторического минимума. И связано это, как считают эпидемиологи, с теми мерами, которые принимаются для сдерживания распространения вируса, вызвавшего пандемию. Это, прежде всего, ношение масок и соблюдение социальной дистанции между людьми. Вирусы гриппа передаются от человека к человеку таким же путем, что и вирус SARS-CoV-2, но их контагиозность ниже.

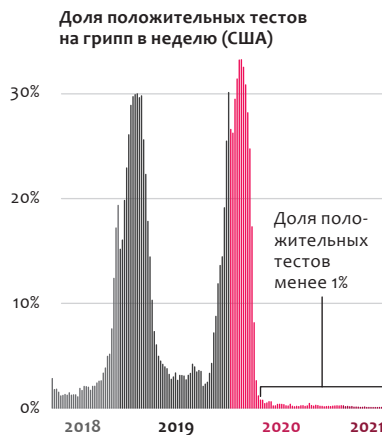
В одной из статей, опубликованных в ноябрьском номере *Scientific American* за 2020 г., говорится, что уменьшение числа заболевших гриппом шло бок о бок с разрастанием пандемии *COVID-19* и имело глобальный характер. По сей день оно остается на беспрецедентно низком уровне. «Грипп попросту исчез», — говорит Грег Поланд (Greg Poland), занимающийся мониторингом этой информации не один десяток лет. В США за осенне-зимний период 2020–2021 гг. было зарегистрировано всего 700 смертей от гриппа. Для сравнения: за такой же период предыдущего сезона их было 22 тыс., а за два сезона до этого — 34 тыс.

Вакцину против гриппа каждый год делают на основе того штамма вируса, который циркулировал в предыдущие 12 месяцев, поэтому неясно, как будут обстоять дела с вакциной 2021–2022 гг. Рекомендации по штамму вируса гриппа ВОЗ дала, как обычно, в феврале,

но они основывались на гораздо меньшем, чем обычно, числе случаев инфицирования. Впрочем, поскольку циркуляция вируса существенно уменьшилась, вероятность его мутирования тоже стала гораздо ниже и можно ожидать, что вакцина будет эффективной.

Эксперты в области здравоохранения смотрят в будущее с оптимизмом. Если привычка чаще мыть руки, носить маску и соблюдать социальную дистанцию в сезоны эпидемии гриппа сохранится, возможно, сами эти сезоны нивелируются — даже в отсутствие административных запретов. ■

Перевод: Н.Н. Шафрановская



Начиная с марта 2020 г. все меньше людей проходило тестирование на грипп, но не это стало причиной снижения официально зафиксированного числа заболевших. Резко упала и доля положительных тестов на грипп.

Еженедельная заболеваемость гриппом (2010–2021)

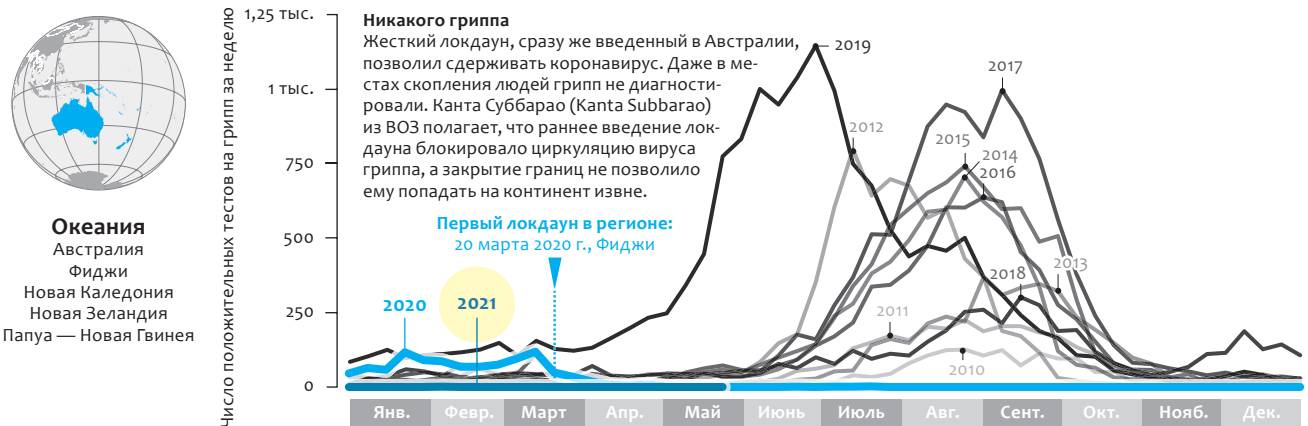
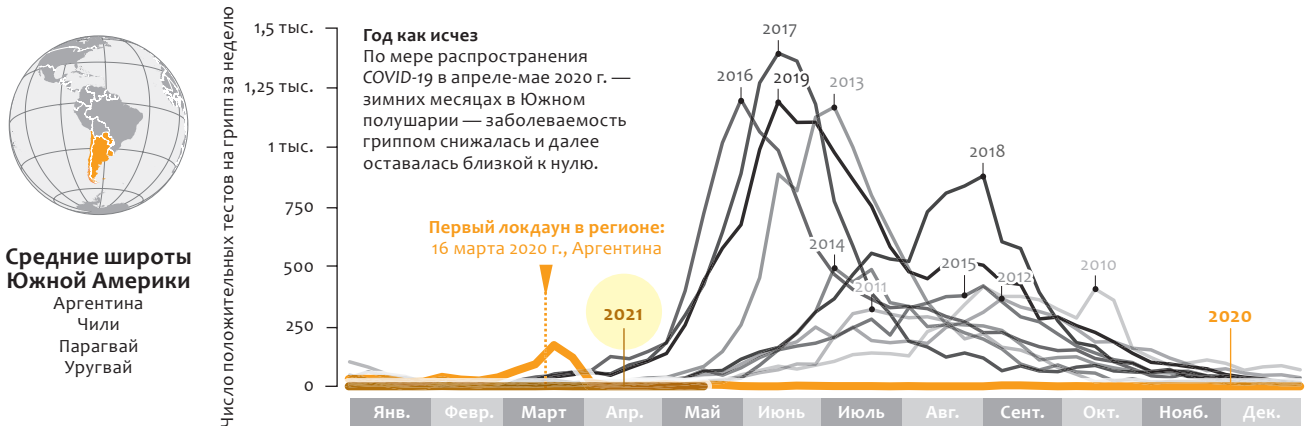
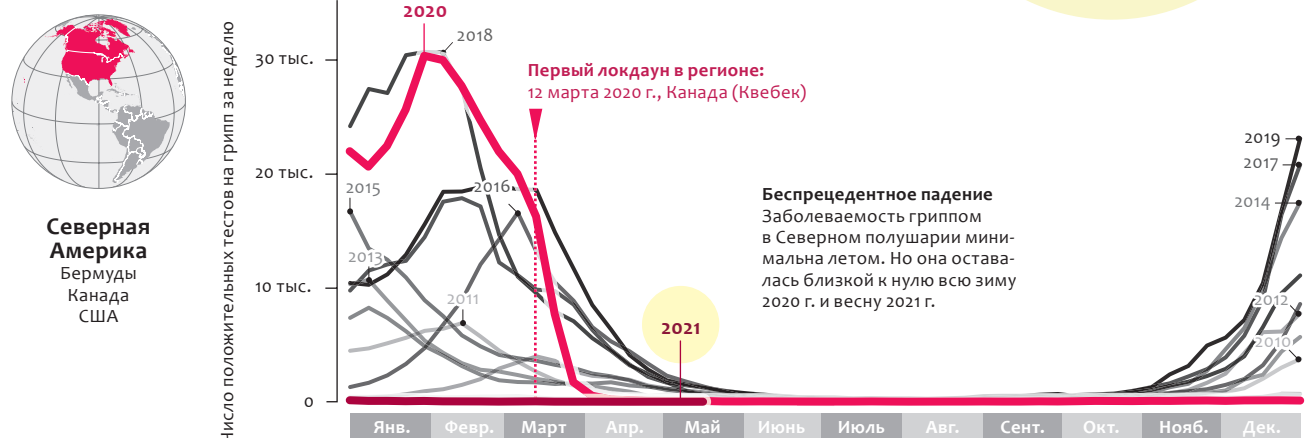
ВОЗ отслеживает еженедельную заболеваемость гриппом в 18 регионах с выраженной сезонностью. В регионах с умеренным климатом этот показатель летом обычно снижается, а зимой растет, но в период 2020–2021 г. он неизменно оставался близок к нулю. Еженедельные замеры включают только тех, кто прошел тестирование на грипп; обычно это 5% от числа заболевших.

Ключ

— До пандемии COVID-19 — В период 2020–2021 гг. Все данные — на 1 июня 2021 г.

Без вести пропавший

Когда в ноябрьском номере *Scientific American* за 2020 г. были опубликованы данные по заболеваемости гриппом, сезон 2020–2021 гг. представляли «выпавшим». С тех пор этот показатель остается близким к нулю по всему земному шару.



Source: FluNet/Global Influenza Surveillance and Response System at the World Health Organization (data)

МОМЕНТ НАДЕЖДЫ

После года царствования болезни и смерти человечество ищет спасения от *COVID-19* в массовой вакцинации

Робин Ллойд

С

начала пандемии прошло больше года, полного страданий и неопределенности. Хмурым апрельским утром к кампусу одного из колледжей Технологического института Нью-Джерси в Нью-

арке, переоборудованному в центр вакцинации, выстроилась огромная — в 2 тыс. человек — очередь желающих сделать прививку. Им должны ввести препарат, ставший самым примечательным биомедицинским достижением в современной истории: безопасную и высокоэффективную вакцину против *COVID-19*. Она была создана и испытана в рекордно короткий срок в ходе десятимесячной гонки в 2020 г. За время, пока ученые трудились над ее разработкой, в США умерли 300 тыс. человек, а по всему земному шару жертвами инфекции стали примерно 2 млн.

Так происходит вакцинация от *COVID-19* в крупном прививочном центре в Ньюарке, штат Нью-Джерси. Центр рассчитан на вакцинацию 6 тыс. человек в день.





ОБ АВТОРАХ

Грант Делин (Grant Delin) — фотограф из Нью-Йорка, удостоенный за свои работы многих наград. Учился мастерству фотографии у Ричарда Аведона и Мэри Элен Марк. Выполнял заказы Смитсоновского института, издательств *Atlantic*, *Washington Post Magazine* и *Popular Mechanics*.

Робин Ллойд (Robin Lloyd) — журналистка, пишущий редактор журнала *Scientific American*, выпускает информационный бюллетень «Умные, полезные, научные материалы о COVID-19» (*Smart, Useful, Science Stuff about COVID-19*). Адъюнкт-профессор программы Нью-Йоркского университета «Создание репортажей о науке, здравоохранении и экологии» (*Science, Health and Environmental Reporting*).



И вакцина фирмы *Pfizer-BioNTech*, за которой выстроилась очередь в Ньюарке, и продукт компании *Moderna* стали кульминацией разработок, в основе которых лежит использование синтетической матричной РНК (мРНК) — аналога РНК вируса SARS-CoV-2. Человечество получило четкий сигнал: пандемию можно побороть.

В исследованиях по созданию вакцин на основе мРНК участвовали сотрудники Национальных институтов здоровья, подразделений Министерства обороны и нескольких университетских лабораторий. В результате ученых удалось найти способ побуждения клеток организма вакцинированного к синтезу вирусного белка, который вызывает мощный иммунный ответ. Были проведены два клинических испытания с участием 70 тыс. добровольцев, по результатам которых эксперты в области создания вакцин и их тестирования из Управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (*FDA*) и Центров по контролю и профилактике заболеваний (*CDC*) пришли к выводу, что оба продукта безопасны и высокоэффективны и могут применяться для массовой вакцинации.

Обнаружилось, однако, что их доступность для разных слоев населения США неодинакова: мешают разного рода барьеры социального и материального характера, а также удаленность мест вакцинирования от мест проживания многих людей. Чтобы их преодолеть, по всей стране были созданы центры массовой вакцинации, один из них и находится в Ньюарке. Он расположен

вблизи крупного железнодорожного узла и автобусной станции и имеет двойное подчинение — местное и федеральное. Тем, кто прибыл сюда без предварительной записи, назначаются дата и время вакцинации, они могут при желании остановиться в бесплатной гостинице. Каждый пациент получает буклет с инструкциями на одном из 50 языков, некоторые сотрудники центра свободно говорят на португальском и испанском. Глухонемые могут воспользоваться видео на американском языке жестов. К 30 апреля 2021 г., спустя месяц после открытия, через центр прошли 150 тыс. человек.

Попав внутрь, посетители регистрируются в одном из 36 приемных постов, отделенных от них пластиковыми перегородками. Затем они перемещаются по импровизированному коридору, идя от стола к столу, к 50 прививочным пунктам, которые разделены высокими матерчатыми ширмами, чтобы создать атмосферу анонимности. Прививаемым разъясняют смысл двухкомпонентности прививки и отвечают на все возникшие вопросы.

Подобные центры не возместят потерь, которые уже понесло человечество, и не исправят допущенные ошибки. И то, что делается в США, остается недоступным для жителей многих уголков земного шара. Но снимки, сделанные в ньюаркском прививочном центре 20 апреля этого года, наглядно демонстрируют, как следует себя вести, имея за плечами трагический опыт. ■

Перевод: С.Э. Шафрановский

Кармита Андраде (*Carmita Andrade*), 51 год (в центре), думала, что умрет, когда в апреле прошлого года заразилась новым коронавирусом, — так трудно ей было дышать. То, что с ней произошло, подтолкнуло к вакцинации ее детей — сына Кристофера и дочь Николь. «Я выжила, — говорит она. — Но, лежа в госпиталь, я не была уверена, что выкарабкаюсь. Многие из умерших от COVID-19 не смогли проститься с родными, мне же повезло, я снова со своей семьей». ▶







Лайла Сайед (Layla Sayed), 17 лет, будущий юрист, работает в тайском магазине мороженого. По ее словам, сделала прививку отчасти потому, что хотела защитить свою маму, с которой вместе проживает. Кроме того, она знает, с какими рисками сталкиваются члены ее семьи, живущие в Египте. «У них нет таких мер предосторожности, как у нас, — говорит Лайла. — Там не делают прививок и тестов. Некоторым даже не приходит в голову надеть маску, у многих просто нет денег, чтобы ее купить. То, что у меня есть возможность получить все это, — большая привилегия».

Алекс Аппиа Фримпонг (Alex Appiah Frimpong), 50 лет, бывший страховой агент, сейчас учится на магистра делового администрирования. Решил сделать прививку, последовав совету пастора своей церкви. «Ходят слухи, что люди умирают от укола, но я этому не верю, — говорит Фримпонг. — После первой прививки я не почувствовал ровно ничего. Теперь второй укол. Я в полном порядке».



Мэри Бреанна Хадон (Mary Breanna Hudon), 30 лет, военный медик, старший сержант ВВС США, работает сейчас в прививочном центре. Обычно она делает более 200 уколов в день, работая два или три дня подряд, иногда в 11-часовые смены. Вспоминает, как делала прививку человеку, пережившему 11 сентября 2002 г. в возрасте 60 лет, который упомянул, что токсическое воздействие взрывов во Всемирном торговом центре привело к развитию у него рака почки. «Я поблагодарила его за то, что в то время он был одним из тех, кто рисковал жизнью во имя нашего спасения, — говорит она. — Теперь пришло время спасать таких, как он».



Сесилия Сешнс (Cecilia Sessions), 46 лет, главный врач центра, полковник ВВС США. Попросила направить ее в Ньюарк — ей хотелось оказывать помощь именно там отчасти потому, что в Нью-Джерси был один из самых высоких показателей смертности от COVID-19 среди всех штатов США. «Многие наши посетители рассказывают о том, как пострадали они лично и кого они потеряли во время пандемии. Несколько дней назад у нас был глухой пациент, и я пригласила переводчика с языка жестов. Получив вакцину, мужчина воскликнул: "Спасибо тебе, господи! Спасибо вам всем!" Он был так переполнен эмоциями, что буквально плакал».



Препарат набирают в шприцы заблаговременно, сразу для нескольких пациентов. Каждый комплект для вакцинации включает пропитанную спиртом салфетку, предварительно заполненный шприц и пластырь. Ампулы с вакциной держат в рефрижераторе, из каждой размороженной ампулы набирают в шприцы шесть доз. Работник Службы общественного здравоохранения США или медсестра из Управления по делам ветеранов следят за ходом всего процесса, а также окончательно проверяют каждый заполненный шприц.





Каджал Неганди (Kajal Negandhi), 39 лет, работающая в службе безопасности пациентов в одной из фармацевтических компаний, рассказывает, что в октябре прошлого года она потеряла в Индии близкую подругу, ставшую жертвой COVID-19. Получив вторую дозу вакцины в Ньюарке, Неганди говорит: «У меня есть малышка. Мне хотелось бы, чтобы ее учителя были вакцинированы, так почему бы и нам самим не привиться? Спасем их, спасем детей, спасем всех вокруг».



Юланда Ли-Кленденен (Youlanda Lee-Clendenen), 56 лет, говорит, что сделала прививку, поскольку знает, что люди ее возраста и с такими тяжелыми заболеваниями, как у нее, подвержены более высокому риску заражения COVID-19. Она хочет и дальше проводить время со своими шестью внуками и мечтает о путешествиях. Кроме того, она считала своим долгом вакцинироваться, чтобы сдержать распространение вируса, а также для того, чтобы рассказать о своем опыте нерадивым родственникам с Сент-Винсента. «Они не желают вакцинироваться, — говорит она. — Но я говорю им: речь идет о вашей жизни. Если вы хотите и впредь подвергать ее риску, дело ваше. Я же намерена обезопасить себя».

Ходан Булхан (Hodan Bulhan), 39 лет, работает ассистентом в юридической фирме. Несколько членов ее семьи и друзья переболели коронавирусной инфекцией в тяжелой форме. Все они выздоровели, говорит женщина, но «вакцина очень им помогла бы, будь она доступна в то время». Пандемия стала для нее ужасным испытанием. «Важно сделать все возможное, чтобы не заболеть или не попасть в больницу. Я верю в прививки. Я дитя 1980-х гг., мне ставили прививки — и со мной все было в порядке. Думаю, сработает и на этот раз».

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Шмидт Ч. Поиски вакцины // ВМН, № 8–9, 2020.



«ПРОП»

В АТОМНОЙ
ЭНЕРГЕТИКЕ

Ы В»»

На площадке Сибирского химического комбината «Росатома» в Северске продолжается строительство первого в мире энергоблока нового поколения БРЕСТ-ОД-300 в рамках отраслевого проекта «Прорыв», реализуемого с 2010-х гг. Создаваемый опытно-демонстрационный комплекс станет воплощением принципиально новой атомной энергетики будущего — экологичной, ресурсосберегающей и конкурентоспособной, а главное, беспрецедентно безопасной.

Об уроках аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» и требованиях к безопасности атомных станций рассказывает научный руководитель Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, член технического комитета проектного направления «Прорыв» академик **Леонид Александрович Большов**.



Академик Л.А. Большов

— Прошло уже 35 лет после аварии на ЧАЭС. Она унесла жизни, нанесла вред здоровью многих людей и, конечно, ухудшила экологическую обстановку. Как вы считаете, каковы главные стратегические просчеты СССР, которые привели к аварии?

— Спустя десять лет после аварии на Чернобыльской АЭС мы начали готовить национальный доклад о последствиях катастрофы. Такой доклад выходит каждые пять лет. В этом году, к 35-летней годовщине аварии на ЧАЭС, мы вновь подготовили национальный доклад, в котором впервые содержалась глава о развитии атомной энергетики и влиянии чернобыльской аварии на этот способ производства электроэнергии. Доклад опубликован в открытом доступе на сайте Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН.

Действительно, авария на Чернобыльской АЭС стала первой крупнейшей аварией в атомной энергетике. Конечно, до этого, в 1979 г., произошла авария на АЭС «Три-Майл-Айленд» в США. Блок был утерян, а активная зона расплавлена. Однако расплав активной зоны остался внутри корпуса. Американцам повезло, ведь за пределы станции радионуклиды не вышли. Тем не менее это событие многих напугало. Это проявилось в том числе и в человеческих потерях, связанных с паникой во время эвакуации и не имеющих отношения к воздействию радиации.

После 1979 г. весь западный мир взялся за последовательное устранение тех недочетов, которые выявила авария на «Три-Майл-Айленд». Прежде всего специалисты

по атомной энергетике осознали, что о тяжелых авариях и их возможных последствиях человечество почти ничего не знает. Поэтому необходимо разрабатывать серьезные исследовательские программы по проведению мелко- и крупномасштабных экспериментов, разработке компьютерных кодов для описания тех или иных явлений, влияющих на безопасность и на выход радионуклидов за пределы станции.

К сожалению, надо признать, что в Советском Союзе американская авария как «первый звоночек» прошла мимо. Атомные командиры убедили начальство в том, что все дело в некомпетентности американских операторов — в то время флотских отставников, не имевших высшего образования. Советское руководство было уверено, что наши операторы — высокообразованные люди и такого безобразия, какое было допущено на «Три-Майл-Айленд», у нас случиться не может. За эту уверенность мы и заплатили чернобыльской аварией.

— В чем вы видите главные причины аварии на ЧАЭС?

— В значительной мере это было головокружение от успехов. Отечественная атомная программа развивалась активно. Советский Союз строил атомные станции не только у себя, но и в Европе, в странах восточного блока. Складывалось ощущение, что этот вид производства электроэнергии полностью освоен и мало чем отличается от сжигания угля, газа или нефти. В качестве подтверждения приведу один факт. За год до чернобыльской катастрофы все атомные станции (кроме Ленинградской) из Министерства среднего

машиностроения СССР перевели в Министерство энергетики наряду с обычными тепловыми станциями. Напомню, что именно Минсредмаш в свое время занимался разработкой атомной бомбы. Здесь нарабатывали плутоний, а потому царил железная дисциплина. После перехода атомных станций в Минэнерго дисциплина поплыла. Между тем атомная энергетика как любой высокотехнологичный и энергонапряженный вид производства электроэнергетики требует уважительного отношения. Все знают, что нельзя садиться за руль пьяным. Такое не прощается. И к атомной станции нужно относиться серьезно и уважительно.

Конечно, те недочеты, которые привели к аварии, были и в конструировании атомной станции, и в проработке ее физики. Напомню: у руководства была четкая убежденность в том, что тяжелых аварий быть не может. За это в итоге мы и поплатились.

— Какой главный урок преподнесла авария в Чернобыле?

— После аварии в августе 1986 г. на площадке МАГАТЭ российская делегация представила доклад о причинах и последствиях чернобыльской аварии, в котором почти все было сказано. Спустя пять лет меня как

руководителя независимого академического института, никоим образом не связанного с предысторией аварии, пригласили возглавить экспертную группу. В то время и следствие продолжалось, и тень прокурора требовала быть очень осторожным в высказываниях.

В течение двух месяцев здесь, в ИБРАЭ РАН, регулярно собирались ученые, спорили до хрипоты и в результате пришли к формуле, которая за последние 30 лет не изменилась. Суть в том, что операторы привели реактор в нерегламентное, нештатное состояние (грубо нарушив инструкции), в котором проявились недочеты научного обоснования и конструкции реактора.

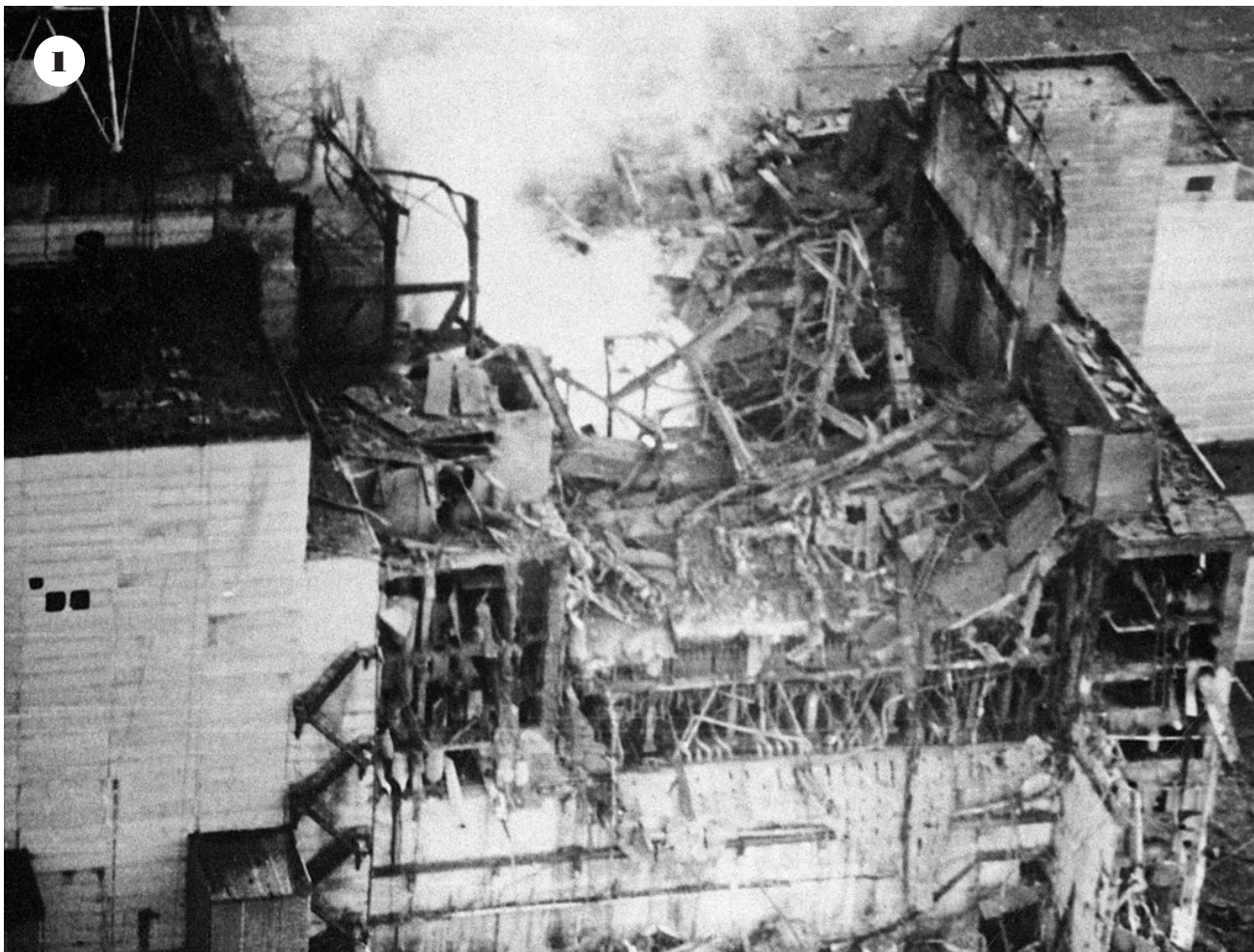
Надо сказать, что после аварии Советский Союз осознал серьезность последствий, поэтому выводы были сделаны самые решительные и правильные, в том числе в отношении руководящих позиций.

— Можно ли сказать, что мы стали лучше понимать процессы, происходящие на атомных станциях и при тяжелых авариях?

— Самое главное — были разработаны и утверждены многочисленные программы



В помещении блочного щита управления энергоблока Чернобыльской атомной электростанции в городе Припяти за несколько месяцев до катастрофы, ноябрь 1985 г. Источник: РИА «Новости».



1. Последствия взрыва на Чернобыльской АЭС, апрель 1986 г. Источник: ТАСС.

2. Дезактивация территории Чернобыльской атомной электростанции, апрель 1986 г. Источник: В.Е. Аньков / РИА «Новости».

3. Вертолеты проводят дезактивацию зданий Чернобыльской АЭС после аварии, май 1986 г. Источник: И.Ф. Костин / РИА «Новости».



по повышению безопасности всего парка атомных станций. И тех, которые были похожи на Чернобыльскую атомную станцию, с реакторами РБМК (большими канальными), и станций, работающих на корпусных реакторах ВВЭР. Тщательный анализ каждого блока, система мероприятий по повышению их безопасности и много других аспектов, которые ранее не считались важными и нужными, стали обязательными.

По существу, до чернобыльской аварии мы не знали, что такое культура безопасности. «Мы» в данном случае — обобщенное понятие. До катастрофы в Чернобыле я к атомной энергетике никакого отношения не имел: занимался лазерами, термоядерной плазмой и другими физическими направлениями. А первым реактором, который я увидел в своей жизни, был четвертый блок Чернобыльской АЭС после аварии. Трубопроводы торчали наружу, крыши не было. Зрелище не для слабонервных. Так вот, до Чернобыля мы краем уха слышали о культуре безопасности, но относились к этому как к очередному извращению империализма. После аварии на ЧАЭС мы осознали, что это очень содержательное понятие. Сегодня оно определяет многочисленные аспекты, но означает по сути следующее: если на любой стадии — при проектировании, конструировании, строительстве, эксплуатации, когда угодно — сталкиваются безопасность и экономика, безопасность и экономия времени, то без каких-либо колебаний нужно отдавать приоритет безопасности. Она —

главная. Поэтому, если оператор, испугавшись, заглушил реактор, хотя для этого особых причин не было, его никто не ругает, премии не лишает, поскольку все понимают: он счел, что в данном состоянии есть опасность, значит, реактор необходимо заглушить.

В целом вопрос подготовки операторов стал прорабатываться качественнее. Если раньше это было чисто бумажное дело — чтение инструкций, книг, — то после Чернобыля на каждой атомной станции в центре подготовки операторов установлены полномасштабные тренажеры, полностью моделирующие действия оператора на атомной станции и реакции станции на действия оператора. Существенную часть своего рабочего времени каждый оператор проводит именно на этом тренажере. Как пилоты, у которых тоже есть свои летные тренажеры. Прежде чем взяться за штурвал и посадить самолет, они много раз делают это на симуляторе — и не каждый раз все получается.

Кроме того, если до Чернобыля мы были отделены железным занавесом от всего мира, то сразу после катастрофы нам протянули руку помощи, приглашая в разные международные организации и проекты. Отечественные специалисты этим активно воспользовались, и все, что было наработано в области безопасности, без какой-то особой коммерции передавалось другим странам. Началось широкое международное сотрудничество, мы стали полноправными членами мирового сообщества.



1. Вид на Чернобыльскую АЭС со стороны четвертого реактора, апрель 1986 г. Источник: И.Ф. Костин / РИА «Новости».

2. Вид на Чернобыльскую АЭС, август 1986 г. Источник: И.Ф. Костин / РИА «Новости».



— Как авария повлияла на науку?

— После аварии количество экспериментов и исследовательских программ сильно возросло. В Курчатовском институте, например, выполнен проект, организованный Агентством по ядерной энергии при Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР). В сложных экспериментах двуокись урана плавилась при температуре 3000°C . Ученые анализировали поведение расплава, как он течет, что с ним далее происходит. А наш институт разрабатывал программное обеспечение, представлял расчеты и аналитику.

Этот проект во всем мире восприняли с большими уважением и радостью, поскольку побаивались проводить подобные эксперименты. Но они были необходимы для обоснования безопасности, того, что будет происходить на станции в случае расплавления активной зоны. В результате экспериментов во всех блоках ВВЭР (водо-водяных корпусных энергетических ядерных реакторах) устанавливаются ловушки для расплава топлива. В случае тяжелой аварии с плавлением активной зоны расплав подхватит специально сконструированная ловушка, в которой он останется навсегда.

— Как она устроена?

— Это корпус, соизмеримый с размером корпуса реактора, с охлаждаемыми водой

стенками. Внутри находится так называемый жертвенный материал, который легко плавится и перемешивается с расплавом активной зоны, снижая температуру. Конвекция в такой жидкости, образованной жертвенным материалом и расплавом зоны, обеспечивает легкий вынос тепла из середины образования к стенкам, которые охлаждаются водой.

— Такие ловушки установлены сейчас на всех атомных станциях?

— Да, на всех отечественных атомных станциях. В мировом сообществе вкусы несколько разделились. Часть разработчиков атомных станций применяют ловушки, часть предпринимают другие меры для предотвращения выхода расплава за пределы корпуса. До сих пор идут споры, проводятся исследовательские программы, чтобы прийти к окончательному выводу. Наши французские коллеги, например, применяют ловушку на каждой станции, правда, немного другой конструкции. Американские организации и вовсе отказались от ловушек.

— А какие еще варианты существуют?

— Должен сказать, количество различных систем повышения безопасности увеличилось, а управление атомными станциями стало более совершенным. Во многом это связано с внедрением современного цифрового управления. Так, в случае аварии автоматически запускаются дополнительные системы охлаждения, которые не дают расплавиться активной зоне. Кроме того, на каждой станции постепенно улучшаются защитные оболочки. Современные оболочки содержат три слоя: железобетон, металл, железобетон. Специалисты внимательно следят за состоянием этой оболочки. При этом она способна выдержать падение большого самолета. Все это — результаты, полученные на основе научных исследований, то, что внедрено в технику, в процесс строительства, в работающие атомные станции. После аварии в Чернобыле все прочувствовали, что при работе со сложной системой атомной станции без науки никуда. Ранее необходимость исследований и экспериментов обосновать было очень сложно. Но после 1986 г. это стало гораздо легче.

В подобных оболочках активно используется так называемый преднапряженный железобетон. При строительстве атомной станции в оболочке проделывают большое количество каналов. В них прокладываются толстые стальные канаты, которые натягиваются до высокого напряжения и при повышении давления при аварии не дадут оболочке разлететься. Ясно, что жизнь не стоит на месте, металлы стареют, деформируются, а напряжение падает. В ИБРАЭ как раз занимались вопросом сохранения этой системы в работоспособном состоянии. Была создана специальная программа, которая собирает данные и обрабатывает их с помощью трехмерных термомеханических программ. В результате на панели у оператора всегда есть текущее состояние оболочки — что с ней можно сделать, что нельзя, в каком она состоянии.

— Вы упомянули тренеры для операторов. В этой связи хочется спросить: как вы оцениваете отечественную отраслевую систему предупреждения ликвидации чрезвычайных ситуаций? Насколько важно обучать сотрудников таких объектов тому, как действовать в опасных ситуациях?

— Действительно, одной из важных областей чернобыльской работы над ошибками стало развитие системы радиационного

мониторинга и аварийного реагирования. Сегодня это серьезная система в нашей стране. Сотрудники ИБРАЭ РАН приложили руку к тому, чтобы такие системы мониторинга появились в 29 регионах России. Они передают данные в региональное управление по чрезвычайным ситуациям, затем дальше вплоть до Национального центра управления кризисными ситуациями МЧС России.

Кроме этого, мы участвовали в создании отраслевой системы. На каждой станции установлено огромное количество датчиков, измеряющих радиацию, состав радионуклидов, спектр, количество в разных формах. Вокруг атомной станции в зоне наблюдения также расположено до 30 датчиков регистрации выхода радионуклидов за пределы здания станции. Вся собранная информация сразу доводится до кризисного центра «Росэнергоатома» на Ферганской улице. В случае аварийной ситуации группа оказания экстренной помощи атомным станциям (ОПАС) собирается вместе для анализа ситуации. Поскольку невозможно быстро собрать всех экспертов в одном месте, «Росэнергоатом» пошел по пути создания центров научно-технической поддержки. Один из таких центров расположен и в нашем институте. В режиме 24/7 дежурные специалисты готовы в любой момент включить компьютеры, запустить исходные данные и сосчитать, что будет через час, день, неделю.

Подобные центры созданы в «Гидропрессе», НИКИЭТ, проектных институтах и других профильных организациях — всего 14 центров научно-технической поддержки. В случае аварии каждый из них активируется для сбора и предоставления информации.

Поскольку аварии, к счастью, случаются очень редко, встает непростой вопрос: а как держать всю эту систему в живом состоянии, чтобы в нужный момент «затвор не заржавел» и «порох не просыпался»? Это удается с помощью тренировок. Несколько раз в год проводятся командно-штабные учения, один раз в год — полномасштабная тренировка на одной из атомных станций со всеми силами и средствами: пожарная служба, армия и т.д. Моделируется аварийное событие, и отрабатывается процесс принятия решений на территории станции и в кризисном центре. После завершения учений происходит разбор полетов: какие были ошибки, что необходимо подтянуть.

Кстати, недавно «Росэнергоатом» — оператор всех наших атомных станций — по рекомендации МАГАТЭ создал Консультативный совет по надзору за ядерной и радиационной безопасностью. В настоящее время я занимаю должность председателя этого совета. Мы регулярно встречаемся с генеральным директором «Росэнергоатома» и обсуждаем, что можно исправить и улучшить. Приятно, что нас слушают и стараются внедрять предложения.

Интересно, что японские коллеги легкомысленно отнеслись к Чернобыльской аварии, поплатившись за это аварией на станции «Фукусима-1». Кстати, благодаря нашей системе обработки данных мы в течение суток собрали информацию о японской станции, сформировали ряд разумных предположений о том, как будет развиваться ситуация, и провели полный цикл расчетов, чтобы предсказать, что и когда случится с каждым блоком и какие будут выбросы. Эта информация была доведена до руководства страны. Эту же информацию российская сторона попыталась донести до японцев. Причем речь шла о людях, которые сами прошли через ликвидацию

последствий чернобыльской аварии, которые после этого 25 лет работали над тем, чтобы устранить все недостатки и несовершенства. Но японцы слушать не стали. Министр по чрезвычайным ситуациям (в то время С.К. Шойгу) отправил российских спасателей в Японию, где 20 тыс. человек погибли от землетрясения и цунами. Вместе с ними спецбортом МЧС в Японию отправились два джентльмена: один — мой приятель с чернобыльских времен из «Росатома» В.Г. Асмолов, второй — мой боевой зам В.Ф. Стрижов. Полетели два самолета. Первый борт со спасателями они сразу же посадили, а второй борт держали почти сутки, не давая разрешения на взлет. Наше посольство тогда проявило чудеса дипломатии, чтобы второй самолет со спасателями, В.Г. Асмоловым и В.Ф. Стрижовым был принят. Когда они все-таки прибыли в Японию и предложили результаты расчетов и практические советы, японские коллеги отказались от помощи. Однако спустя полгода к нам зачастили японские делегации одна за другой. С тех пор во многих текстах я употребляю оборот: к тяжелым авариям лучше готовиться до того, чем после того.



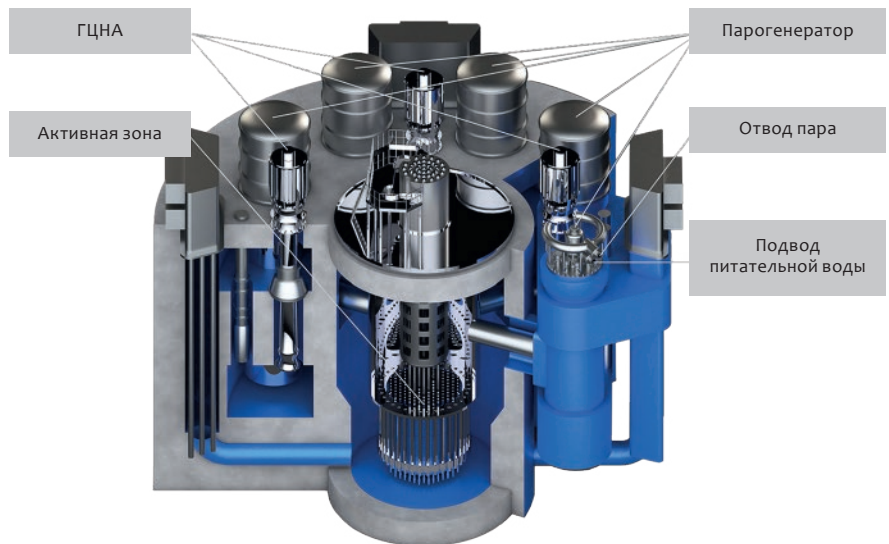
Разрушенный энергоблок № 4 АЭС «Фукусима-1», 12 ноября 2011 г. Источник: Дэвид Гуттенфельдер / Associated Press.

— Реализуемый сегодня проект «Прорыв» как раз нацелен на обеспечение принципиально нового вида атомной энергетики, а также на безопасность. Одна из главных целей — исключить аварии, которые требуют эвакуации, а тем более отселения людей с прилегающих территорий. Как вы считаете, спустя 35 лет после аварии на ЧАЭС и десятилетие после аварии на станции «Фукусима-1» сможем ли мы реализовать цели проекта «Прорыв» и обеспечить безопасные атомные станции?

— Последнее десятилетие я активно участвую в этом проекте, потому что убежден: цель поставлена очень правильно. Конечно, создавая нечто новое, мы можем столкнуться с неудачами или осознать, что все оказалось сложнее, чем мы думали. Но мы надеемся на успех.

В стране накоплен уникальный опыт работы с реакторами на быстрых нейтронах. В свое время этим направлением занимались американские, французские и японские коллеги. Но сегодня Россия — единственная страна, которая до сих пор успешно эксплуатирует реакторы с натриевым теплоносителем на быстрых нейтронах на Белоярской атомной станции: БН-600 и БН-800. Преимущество реактора БРЕСТ в «Прорыве» состоит в том, что вместо интенсивно горящего натрия используется расплав свинца, а вся конструкция собрана в одном корпусе — и парогенератор, и насосы. В них практически нет риска потери теплоносителя по причине выкипания или разрыва трубопровода.

Помимо этого, нитридное топливо более плотное, следовательно, запас реактивности, который приводит к разгону реактора, очень маленький. При аварийной ситуации не будет резкого взрыва. Эти два фактора и целый ряд других характеристик позволяют нам надеяться, что в результате освоения этой технологии мы реализуем более безопасную атомную энергетику — как с точки зрения безопасности самой электрогенерации на блоке с быстрыми реакторами, так и с точки зрения обращения с радиоактивными отходами. Важно и то, что в качестве топлива в быстрых реакторах используется природный уран.



3D-модель реакторной установки БРЕСТ-ОД-300. Источник: сайт проекта «Прорыв» (proyuv2020.ru).

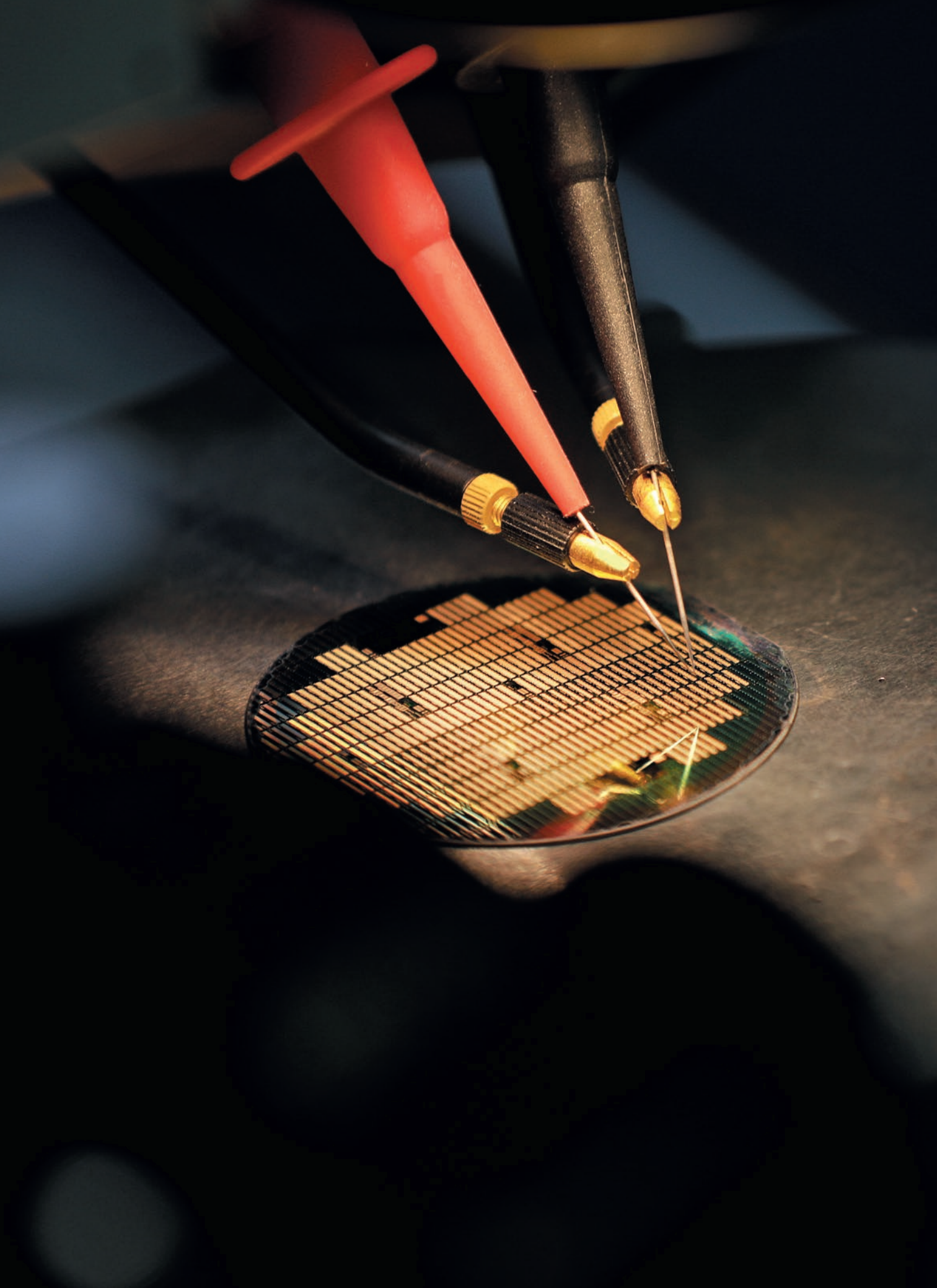
Отработавшее ядерное топливо эксплуатируется вновь, а отходов образуется намного меньше.

В рамках проекта «Прорыв» в Северске продолжается строительство комплекса, модуля фабрикации и рефабрикации топлива, реактора БРЕСТ и модуля переработки. Реализуется замкнутый ядерный топливный цикл в пределах одной площадки.

Зная наши успехи в области разработки компьютерных кодов, анализа, расчета, сотрудников ИБРАЭ РАН с самого начала пригласили сопровождать этот проект. Мы разрабатываем коды нового поколения, более точные, более быстрые, и снабжаем ими конструкторов и проектантов. Прошло почти десять лет с начала этого проекта, и у нас уже наработано больше десятка сложных, точных, прецизионных кодов, аттестованных в Ростехнадзоре.

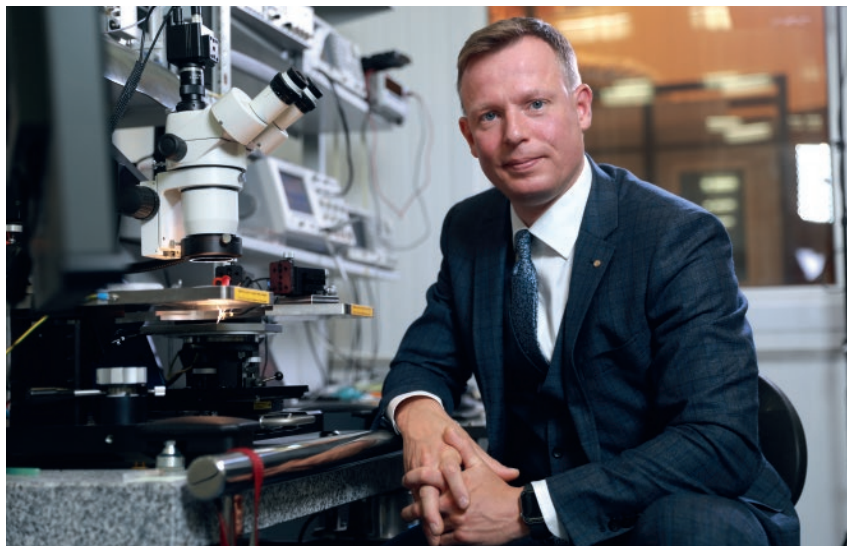
Я уверен, что проект «Прорыв» — главный атомный инновационный проект в России и в мире. И если нам удастся его реализовать, через некоторое время весь мир перейдет на быстрые реакторы. Даже главный законодатель мод в энергетике американская компания *Westinghouse Electric* в качестве следующего технологического направления наметила для себя создание быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем и нитридным топливом. Видимо, со здравым смыслом и научным знанием не поспоришь. Вполне возможно, что мир в скором времени пойдет по нашим стопам. ■

Беседовала Анастасия Рогачева

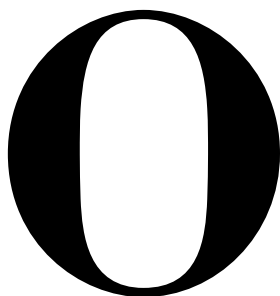


СЛОЖНЕЙ ИЗОБРЕШЕНИЕ ЧЕЛО ТЕННИЕ ВЕЧЕСТВА

Основная миссия лаборатории прикладных нанотехнологий НИЦ «Курчатовский институт», созданной по инициативе М.В. Ковальчука еще в 2008 г., — разработка микроэлектронных интерфейсов, обеспечивающих связь микроэлектронного технологического пространства и живой материи, а также исследования в области СВЧ-электроники, сверхпроводящих материалов, микрофлюидики и других прорывных направлений науки.



Кандидат физико-математических наук М.Л. Занавескин



О том, почему самые сложные изобретения в мире связаны именно с микроэлектроникой, мы говорим с начальником отдела прикладных нанотехнологий Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий **Максимом Леонидовичем Занавескиным**.

— **Какую роль в нашей жизни играет микроэлектроника?**

— Я думаю, каждый житель нашей страны, да и не только нашей, прекрасно понимает, что микроэлектроника поменяла весь мир радикальным образом. Сейчас, когда смотришь с детьми старые фильмы, трудно им объяснить, почему в той или иной ситуации нельзя было просто позвонить по мобильному телефону и предупредить. Ведь, казалось бы, что может быть проще? Но для того чтобы это стало возможным, была проделана колоссальная работа и потребовались десятилетия исследований.

Можно сказать, сегодня мы стали свидетелями нового технологического уклада, который сформировался благодаря цифровизации.

Мы видим, как буквально на наших глазах персональные компьютеры, поисковые системы все больше вовлекают нас в мир искусственного интеллекта. По сути, это нейросети, которые занимаются обработкой огромных массивов данных. Помню, как в студенчестве, чтобы найти какую-то подходящую научную статью, нам приходилось часами сидеть в библиотеке, заполнять карточки, заказывать журналы

и т.д., а сейчас нажал две кнопки — и получаешь целую подборку литературы в соответствии со своим поисковым запросом. Причем с каждым годом эти системы поиска обучаются и делают свою работу все эффективнее.

А вообще, микроэлектроника, если говорить о том, как она устроена внутри, — это удивительный и чудесный мир. Пожалуй, на сегодня это самая сложная из когда-либо созданных человеком технологий. А основа всего — сверхбольшая интегральная схема (СБИС), тот процессор, который работает в наших компьютерах. Что он собой представляет? Это кристалл кремния, на котором сформированы транзисторы, а их размер в сотни раз меньше длины волны света, то есть сопоставим с сотнями атомов. И таких транзисторов там несколько десятков миллионов. А теперь представьте, что вам нужно сделать 10 млн абсолютно одинаковых транзисторов на кристалле размером 2×2 см, и это лишь малая часть пластины; современные пластины — это 300–450 мм в диаметре. Так вот, для того чтобы сделать такое устройство (процесс занимает около двух месяцев), создается специальный технологический маршрут, по которому идет

эта пластина, на ней формируются транзисторы за множество итераций, над ними производят, наверное, десятки тысяч различных манипуляций — и все это в абсолютно чистых, специальных условиях. Сложнейшее дело! И все эти 10 млн должны работать как часы: точно и абсолютно одинаково. Поэтому микроэлектроника — очень сложная и интересная область, и она не перестает меня увлекать на протяжении многих лет.

— Казалось бы, все уже изобретено, все прекрасно работает. Как эволюционирует микроэлектроника?

— С точки зрения обычного пользователя действительно может показаться, что все уже изобретено. Но человеческая мысль никогда не стоит на месте. И если углубиться в детали, то вы поймете, что мир микроэлектроники — это бурно кипящий котел изобретений, новых технологий.

Микроэлектроника очень специфична в каких-то спецзадачах. Но дело не ограничивается только тем большим процессором СБИС, о котором я упоминал выше. Собственно, был процессор, он умел считать. Потом решили, что было бы неплохо быстро передавать информацию, — в итоге появились части процессора, которые адаптированы и специализированы для того, чтобы передавать большие числа. Затем появилась задача создавать компьютерные игры, то есть «натягивать» на некий трехмерный образ изображение, скин. В результате появились графические ускорители — специализированные процессоры, направленные на решение определенных задач. Сейчас появились и так называемые сопроцессоры, которые в основном решают задачу распознавания лиц, голосов и т.д., — это нейроускорители, работающие по нейроалгоритмам. И вся эта система постоянно развивается.

Еще есть часть электроники, которой мы как раз здесь больше занимаемся, — связанная не с цифрой, а с радиосигналом. Грубо говоря, наш телефон должен «договориться» с базовой станцией, а она, в свою очередь, должна ему «ответить». Все это становится возможным благодаря мощной СВЧ-аналоговой электронике (СВЧ — сверхчастотной), которая, в частности, отвечает за то, чтобы автомобиль, например, мог определить расстояние до бампера соседней машины, или, скажем, радар — увидеть какой-нибудь самолет далеко в небе и т.д. Это и гражданское, и специальное применение.

Вы, наверное, обратили внимание, что с каждым годом буквы в уголке вашего сотового телефона меняются: 2G, 3G, LTE и т.д. Что это значит с точки зрения пользователя? А то, что раньше мы ждали пять минут, чтобы загрузить одну картинку, а сейчас уже без проблем смотрим видео высокого разрешения в своем мобильном интернете. Все это определяется постоянным прогрессом в области упомянутых СВЧ-технологий. Устройства становятся мощнее, на больших частотах, что позволяет быстрее передавать информацию.

— И, наверное, не только мощнее, но и меньше? Тенденция к миниатюризации по-прежнему сохраняется в мире электроники?

— Очень интересный и отчасти философский вопрос, и ответов на него существует много. Миниатюризация не возникает просто так, она всегда нужна для каких-то определенных целей.

С точки зрения самой микроэлектроники миниатюризация хорошо согласуется с законом Мура, который гласит, что количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые два года, а значит, за определенное количество лет критический размер в топологической схеме должен уменьшиться в два раза, то есть плотность элементов вырастет в два раза. Зачем это нужно? Закон Мура — это история не про плотность элементов на пластине, а про деньги, и, если коротко, так выгоднее, ведь уплотнив элементы на одной и той же пластине, мы получаем больший выход.

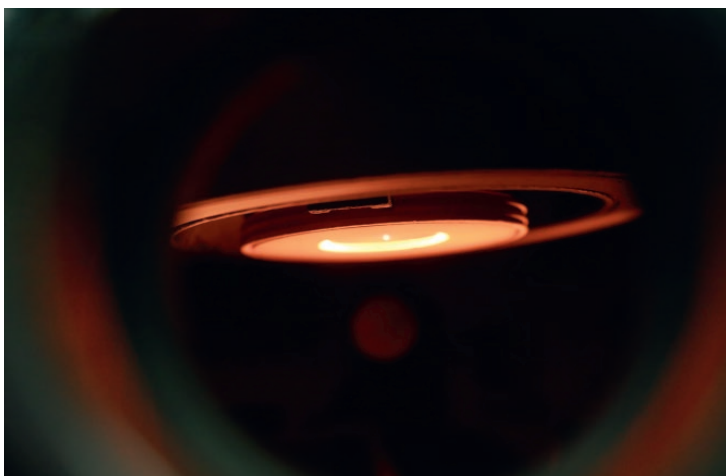
Второй важный момент, связанный с миниатюризацией: наша электроника греется, когда работает. Было очень много ухищрений, чтобы избежать этого нагревания или минимизировать его. И одно из решений проблемы — миниатюризация, потому что зачастую такие паразитные явления, как утечки токов и т.д., связаны как раз с размером элемента: чем меньше элемент, тем меньше этих самых утечек. И это, кстати, вызов, связанный и с долговременной автономной работой устройств. Борьба за долгую автономную работу с минимизацией потерь, утечек и пр. всегда актуальна в нашем деле.

— Подобные исследования, насколько я знаю, ведутся и в вашей лаборатории. Расскажите подробнее о том, над чем вы работаете с коллегами.

— Тематик у нас довольно много, но давайте коснемся одной из главных — СВЧ-электроники, а именно усилителей мощности.

Приведу простой пример. У нас есть радар и есть некий объект в небе, пусть это будет ворона. Мы хотим узнать, где она находится, куда летит и что с ней происходит. Для этого нужно просканировать небо лучом электромагнитных волн. У электромагнитного излучения есть длина волны. Соответственно, мы должны ее выбрать. Каким образом? В принципе, длина волны должна быть сопоставима с размером вороны. Раньше для подобного сканирования ставили большую мощную лампу, которая генерировала то самое СВЧ-поле, разделяли его на множество каналов и в каждом ставили свой фазовращатель, чтобы, управляя фазой точечных излучателей, просканировать небо. Но таким образом все небо особо не просканируешь, поэтому приходилось эту штуку еще и крутить. Однако благодаря появлению так называемой твердотельной электроники, когда от ламп уже отказались, у нас теперь есть возможность в крошечном кристалле на нескольких квадратных миллиметрах иметь генератор очень большой СВЧ-мощности. Твердотельный генератор может быть установлен в каждый такой канал по отдельности, он управляет фазой сигнала и т.д. Как результат — мы можем видеть дальше и намного больше объектов.

Возвращаясь к вопросу о том, что все уже давно открыто: как ни странно, еще далеко не все, и новые материалы появляются постоянно.



Выращивание кристалла нитрида галлия в установке молекулярно-лучевой эпитаксии происходит при температуре подложки 700–1200°С

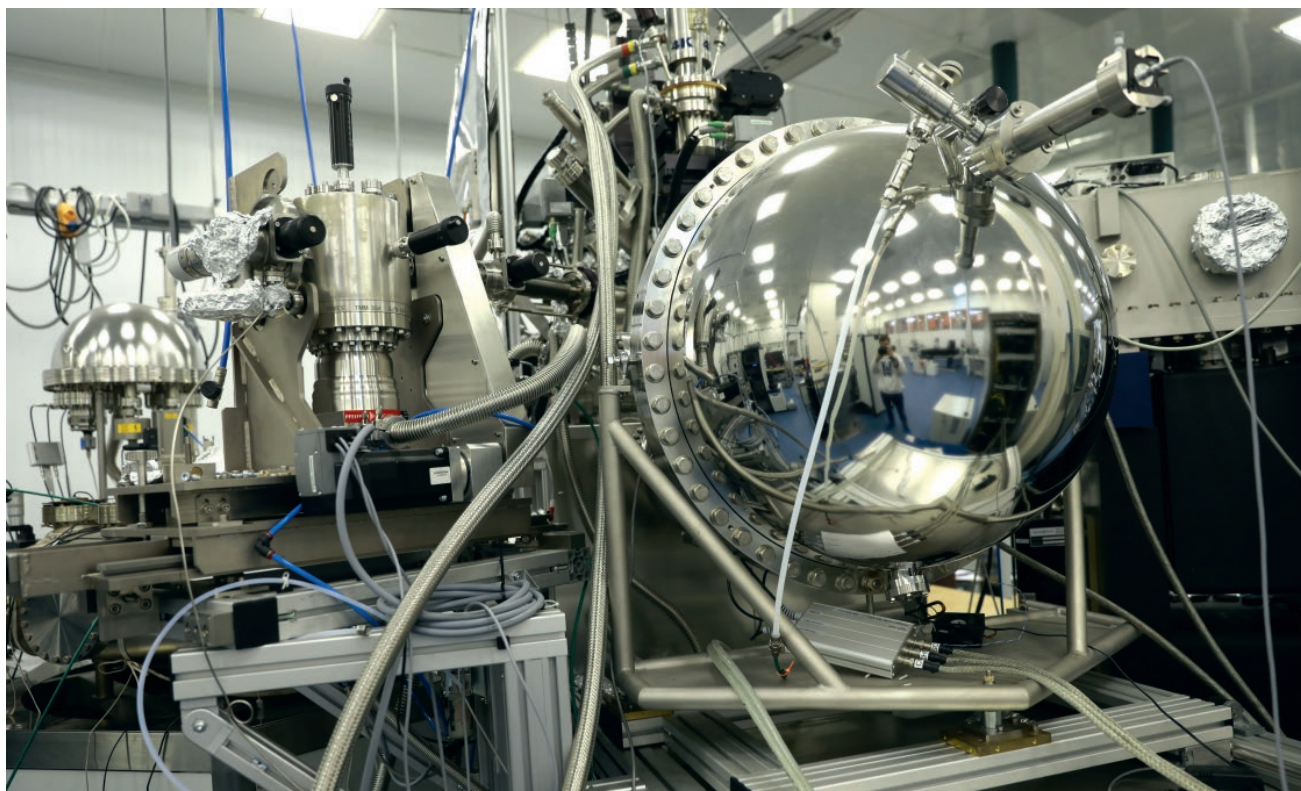
Появление новых технологий — процесс довольно медленный: как правило, речь идет о десятилетиях. Но если вспомнить историю, то сначала у нас были так называемые арсенидные гетероструктуры, на основе которых создавались транзисторы для сотовых телефонов, а сейчас материал поменялся и речь идет уже о сотовых связях нового поколения, у которых пропускная способность на порядок выше.

— На основе кремния?

— Кремний — это один материал моностава. Мы можем управлять его физикой, вводя в его состав разные примеси. Грубо говоря, намазываем на кремниевую пластину фосфор и кладем в печь. Фосфор диффундировал в кремний, и получилась область с измененной проводимостью. На этом принципе работают все наши кремниевые устройства, нули и единицы. Но для того чтобы сделать светодиод или СВЧ-транзисторы, нужен иной подход. Мы берем некую кристаллическую подложку, а дальше с помощью установки, в условиях вакуума, близкого к космическому, распыляем атомы материалов. В абсолютно чистых условиях на подложку ничего лишнего не попадает. Чтобы этого добиться, мы располагаем в камере экраны, наполненные жидким азотом, а жидкий азот — это -200°C . Рядом стоят емкости с металлом, разогретые до температуры 1500°C . Оттуда расплавленный металл вместе с рабочими газами попадает на подложку, где происходит специфическая химическая реакция. Мы искусственно растим кристалл на этой подложке, это так называемый эпитаксиальный рост. Кристалл наследует структуру кристаллической подложки, таким образом реализуется направленный рост кристаллов на кристалле. Что мы в этом случае можем делать в отличие от кремния? Мы можем менять состав кристаллов в процессе роста, то есть растить «бутербродики» с разными свойствами, и благодаря тому, что эти свойства управляемо изменяются, мы можем получать ту физику, которая кремнию недоступна.

Основные продукты гетероструктурной электроники — это СВЧ, светодиоды, которые у нас сплошь и рядом. Экономия энергии при этом составляет десять порядков, а КПД в разы улучшается, потому что светодиод в отличие от лампы накаливания не греется.

— Есть ли какой-то новый материал, который может стать основой для новой будущей микроэлектроники? Может, графен?



Установка молекулярно-лучевой эпитаксии отечественного производства, которая позволяет получать высококачественные нитридные гетероструктуры для СВЧ-электроники и светодиодов

— Я считаю, что не будет никакой посткремниевой эры. В кремниевое направление вложено колоссальное количество денег, технологий, человеческих ресурсов. Понимаете, чтобы появилась новая технология, она должна быть не чуть-чуть лучше, а принципиально лучше. Она должна давать качественно иные уровни и результаты. А чем, собственно, кремний не устраивает? Кремний в широком понимании, включая архитектуру того, что из него можно делать, конечно же себя не исчерпал и вряд ли на нашем веку исчерпает. И пока нет ничего такого, что обещало бы заметно большую выгоду в ближайшее время

Что касается графена, я думаю, его значение изрядно переоценивают. О графене много говорили начиная с 2000-х гг. и говорят по сей день. Прошло 20 лет — и где реальные прорывные результаты и повсеместное применение? Этого пока не видно. Дело в том, что графен не особо технологичен. Получить графен в виде монослоя на какой-то подложке, с которой работает микроэлектроника, пока толком никому не удалось. Все эти графитовые вещи, безусловно, очень полезны в создании, например, карбоновых велосипедов. Очень легкая

и прочная рама. Графитовые наноструктуры хороши для создания композитных материалов. Но если мы говорим о серьезной науке, здесь графен пока так и остается в рядах лишь подающего надежды материала.

— Вернемся к вашим исследованиям. Вы их оцениваете как фундаментальные или прикладные?

— В первую очередь это прикладные исследования. Дело в том, что специфика тех материалов (нитрид галлия, гетероструктуры и т.д.), с которыми мы работаем, и той электроники, которой мы занимаемся, критически важна для обороноспособности страны, для развития собственных технологий связи и других технологий. Эти технологии обязательно нужно иметь в России, а не покупать за рубежом.

Как это выглядит на практике? Есть, например, зарубежная технология, и мы пытаемся сделать такую же у нас, или не такую же, а даже лучше. В процессе в голову приходят разные идеи, которые мы апробируем. Таким образом появляются и некие фундаментальные направления, которые зачастую находят свое применение в будущих технологиях.

В частности, у нас есть очень интересная работа — рост нашего материала, гетероструктур нитридов, на алмазных подложках. Дело в том, что алмазы — уникальный материал с замечательной теплопроводностью. Зачастую возможности применения электроники ограничены тем, как отвести оттуда огромное количество тепла. Мы придумали, как сделать транзисторы с алмазным теплоотводом, которые позволяют в несколько раз поднять мощность транзисторов и на несколько порядков продлить срок их службы.

Наши изобретения находят свое применение также в космической и атомной отрасли, ведь материалы, которыми мы занимаемся, имеют очень хорошую радиационную стойкость.

— С какими сложностями вам приходится сталкиваться в процессе работы?

— Самое сложное — это междисциплинарность. Дело в том, что современная наука сильно специализирована. Людей, которые понимают сквозным образом в какой-то тематике, очень мало. А большая часть специалистов — это люди, решающие сугубо узконаправленные вопросы. Да и сами исследования крайне фрагментарны: скажем, кто-то выбрал новые материалы и показал, что с ними возможно что-то сделать, но довести все до конечной продукции — это редчайшая вещь, мало кто на это способен.

В нашей лаборатории мы занимаемся полным технологическим циклом от эпитаксиального роста гетероструктур до создания транзисторов. На все это уходит около двух-трех месяцев. Самое сложное — иметь терпение и волю, чтобы довести идею до реального воплощения, а также

внимание, чтобы следить за каждой технологической операцией. И часто только в конце процесса удается узнать, правильны ли были изначальные предположения.

— Много ли молодых сотрудников в вашей команде? Какие специалисты наиболее востребованы здесь?

— Наша лаборатория открылась в 2008 г., и тогда мы активно набирали молодежь. Мы брали практически всех желающих, многие ребята из ведущих физических, физико-технических вузов и факультетов нашей страны проходили дипломную практику или аспирантуру в нашей лаборатории в стенах Курчатовского института. Понятно, что для работы здесь нужно определенное образование, но самое главное качество, которым должен обладать специалист, — это любовь к процессу. Многие люди настроены на результат, и это тоже хорошо, но когда результата порой приходится ждать месяцами или годами, как это часто случается в науке, а иногда он бывает отрицательным, то любовь к самому процессу — ключ, который позволяет двигаться дальше. И, конечно, важно уметь взаимодействовать с коллегами, вместе добиваться поставленных целей.

В целом могу сказать, что у нас, как, наверное, и везде, востребованы люди, которые готовы брать на себя ответственность, которые работают по совести и с интересом к своему делу. Вот эти качества очень важны, а всему остальному можно научиться.

— Как часто вы взаимодействуете с коллегами из других лабораторий Курчатовского института?

— Междисциплинарные исследования играют важную роль в нашей работе.



Сотрудники лаборатории твердотельных структур Е.М. Колобкова и И.С. Езубченко контролируют ростовые операции. Типичный цикл роста кристалла составляет шесть-девять часов. Ежегодно в лаборатории в отделе прикладных нанотехнологий Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий работают более десяти молодых сотрудников.

С коллегами по цеху мы общаемся постоянно, с большим удовольствием и взаимной пользой. В первую очередь это исследования, касающиеся диагностики наших изделий. В нашем институте существуют огромные возможности для взаимодействия в плане роста кристаллов и того, как выглядят транзисторы на уровне отдельных атомов и т.д. Прямо за стеной нашей лаборатории находится Курчатовский синхротрон — уникальный инструмент, с помощью которого можно посмотреть на тончайшие слои кристаллов, которые мы выращиваем. У нас есть замечательные коллеги, которые занимаются экзотической новой электроникой на основе сверхпроводимости. Мы с ними очень активно работаем и друг другу помогаем.

— А что насчет международного сотрудничества? Во время пандемии его стало меньше?

— Отнюдь нет, пандемия не сократила количество наших контактов с иностранными коллегами, так как большая часть этого общения и до пандемии проходила в режиме онлайн. Так что международное сотрудничество продолжается.

Пожалуй, наша самая рейтинговая публикация в соавторстве с европейскими коллегами вышла в 2018 г. — она называется *k-space imaging of anisotropic 2D electron gas in GaN/GaAlN high-electron-mobility transistor heterostructures*. Эта работа была опубликована в журнале *Nature Communications*. Наши коллеги, работая на швейцарском синхротроне SLS, впервые посмотрели с помощью метода фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением структуру двумерного электронного газа в наших гетероструктурах. Эта работа имеет фундаментальный характер, но для нас важно, что мы впервые увидели, нащупали что-то новое о природе вещей. Сейчас это сотрудничество продолжается, и мы пытаемся создать некий транзистор с затвором из графена, чтобы он был прозрачным для методики наших иностранных коллег, чтобы там можно было менять состояние двумерного газа и т.д.

— Сейчас, в Год науки и технологий в России, часто поднимают вопрос о привлечении молодежи в науку. А что, на ваш взгляд, влияет на решение юношей и девушек связать свою жизнь с наукой?

— Сложный вопрос. Я обычно сразу спрашиваю молодых ребят о том, кто их родители, и чаще всего выясняется, что они тоже



Одна из задач лаборатории прикладных нанотехнологий — создание электронных интерфейсов, обеспечивающих связь микроэлектронного технологического пространства и живой материи

занимаются наукой. Так что преемственность, думаю, играет здесь одну из главных ролей. Когда молодежь видит пример успешной реализации в науке в лице своих родителей или друзей, это тоже оказывает огромное влияние.


Что еще может привлекать людей? Безусловно, деньги. Достойная зарплата, конечно, нужна, но деньги — далеко не первый фактор, влияющий на решение связать свою судьбу с наукой. Наука — это определенный склад ума.

Для молодежи важен также и престиж, определенное отношение к профессии в обществе. Поэтому, чтобы привлечь людей в науку, нужно грамотно заниматься ее популяризацией. Человеку всегда проще тянуться к каким-то псевдонаучным идеям, которые так часто транслируют по телевидению и в интернете, в то время как настоящая наука заставляет нас напрягать мозг — здесь нет простых решений.

И напоследок упомяну еще такой фактор, как жилье. Для молодых ученых, особенно из регионов, это очень важная составляющая при принятии решения. Жизнь москвича и немосквича с ипотекой при одном и том же доходе сильно различается. Возможно, служебное жилье от институтов за выслугу лет или за другие заслуги существенно повысило бы привлекательность научной карьеры для молодежи.

Вообще, в последние годы престиж отечественной науки снова растет. И это не может не радовать! ■

Беседовала Янина Хужина



ПОЛЕТЫ НАД

как российские ученые

АРКТИКОЙ исследуют атмосферу

В Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения РАН работает единственный в стране постоянно действующий научно-исследовательский самолет-лаборатория. Ту-134 «Оптик» предназначен для измерения оптических и метеорологических параметров атмосферы, состава воздуха, зондирования подстилающей поверхности, включая водную. О работе уникального летательного аппарата, климатических изменениях и результатах зондирования атмосферы над морями Арктики рассказывает директор Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН доктор физико-математических наук **Игорь Васильевич Пташник**.



Доктор физико-математических наук
И.В. Пташник

— Игорь Васильевич, чем уникален самолет Ту-134 «Оптик»?

— Наш самолет-лаборатория — единственное сегодня в стране воздушное судно, которое регулярно совершает полеты для проведения научных исследований. Он оборудован широким набором современных приборов для измерения самых разных параметров атмосферы. Воздушные наблюдения на территории России с помощью поколения подобных самолетов проводятся нашим институтом ежегодно на протяжении вот уже 40 лет. За эти годы нам удалось накопить бесценные знания о свойствах и динамике атмосферы над всей территорией бывшего СССР, а теперь России, и над морями российской Арктики.

В прошлом году у нас состоялась уникальная экспедиция (подобных экспериментов не было даже в Советском Союзе): самолет совершил облет на разных высотах всех шести морей российской Арктики: Баренцева, Карского, Восточно-Сибирского, Чукотского, Берингова и моря Лаптевых. Были выполнены измерения ряда важнейших параметров: в первую очередь это, конечно, концентрация разных газов, включая парниковые — углекислый газ, метан и др., а также параметры аэрозоля, радиационных характеристик (излучений от Солнца) и т.д. Измерялись также некоторые характеристики поверхности морей. Исследования атмосферы проводились на высотах от 200 до 9 тыс. м над уровнем моря.

Ну и, конечно, исключительная особенность самолета-лаборатории «Оптик» — это наш летный отряд: ученые, как молодые, так и уже солидного возраста, всецело увлеченные своим делом.

— О чем говорят полученные результаты? Нам стоит тревожиться?

— В ходе арктической экспедиции получены интересные и, как вы верно отметили, тревожные результаты. Один из них, можно сказать, основной, — это повышенное содержание метана, сильного парникового газа: он в десятки раз сильнее, чем CO_2 (просто в нашей атмосфере его содержится гораздо меньше, чем диоксида углерода). Повышенное содержание метана было зафиксировано над всеми шестью морями российской Арктики.

Следует подчеркнуть, что повышение концентрации метана в приземном слое воздуха в Арктике было ранее зафиксировано в судовых экспедициях, а интегральное содержание — по спутниковым данным. В отличие от этих результатов мы измерили с высокой точностью его вертикальное распределение во всей толще тропосферы — от приземного слоя до тропопаузы (высоты, на которой температура начинает расти), которая в этих широтах находится на 9–10 км. В некоторых полетах самолет ее пересекал.

— С чем связано такое повышенное содержание метана?

— Есть разные гипотезы. Например, что в теплеющем океане биота начинает более интенсивно выделять метан, а он из океана поступает в атмосферу. По другой версии (члена-корреспондента РАН И.П. Семилетова), это может быть результатом разложения газогидратов под шельфовыми льдами. Авторы считают, что из-за таяния многолетней мерзлоты шельфов этих морей (вследствие потепления климата) газогидраты под ними начинают разлагаться

и метан просачивается в эти «проталины», либо сама тающая мерзлота также может быть источником эмиссии карбонсодержащих газов. Но эта версия, пожалуй, сегодня наименее поддержана научным сообществом.

Исследования члена-корреспондента РАН И.В. Богоявленского говорят о том, что это скорее всего связано с естественными тектоническими процессами, в результате которых происходит как таяние многолетней мерзлоты под шельфами арктических морей, так и разложение газогидратов с выходом карбонсодержащих газов. То есть в этой версии нагрев получается вследствие тектонических процессов, снизу, а не из-за воздействия антропогенных факторов. И тогда это явление может как усиливаться, так и ослабевать в разные периоды времени.

Есть версия о том, что это биота, обитающая в воде, выносится в арктические моря из устьев великих сибирских рек. Вдоль всего побережья Северного Ледовитого океана есть многочисленные озера, насыщенные биотой, которые также могут давать эмиссию метана в летнее время.

Подытоживая: сегодня пока нет окончательной определенной версии, объясняющей повышенное содержание метана над морями российской Арктики. Существуют разные гипотезы. И, конечно, это большой вызов для научного сообщества. Узнать причину очень важно.

— Метан распределяется над всеми шестью морями равномерно или над какими-то из них концентрация выше?

— По данным И.П. Семилетова, обнаружившего «сипы» в ходе судовых экспедиций, максимальная концентрация метана наблюдается над Восточно-Сибирским морем и морем Лаптевых. По нашим самолетным данным, наибольшая концентрация метана была зарегистрирована над Карским и Баренцевым морями: почти до 7% выше, чем фоновое содержание. Над другими морями превышение над фоном меньше — 4–5%. Но над всеми морями зафиксировано повышенное содержание в нижних нескольких километрах над уровнем моря, которое потом быстро спадает. На высоте около 1–2 км концентрация уменьшается уже почти до фоновой, кроме Карского моря, где метановый шлейф тянется до нескольких километров.

— А какое есть объяснение подобному распределению?

— Это тоже пока непонятно. Может быть, дело в частичном выносе воздушных масс

с суши, в том числе с прибрежных озер, которые, как я сказал, насыщены биотой и потому выделяют в атмосферу много метана. Может быть, они больше воздействуют на Баренцево и Карское моря, так как на их прибрежных территориях находится огромное количество таких озер. Вблизи восточных морей рельеф гористый и озер значительно меньше. Но это пока однозначно не установлено и еще предстоит выяснять.

— В одном из своих недавних выступлений вы говорили, что наши деревья стали хуже поглощать CO₂. С чем это связано?

— Пока наши исследования дают только некоторые основания для таких действительно тревожных выводов. За 25 лет наблюдений нами было обнаружено, что так называемая минимальная концентрация CO₂ над бореальными лесами Сибири до 2005 г. практически не росла, то есть тренд был почти нулевой. Минимальная концентрация наблюдается летом, так как в этот период леса наиболее активно

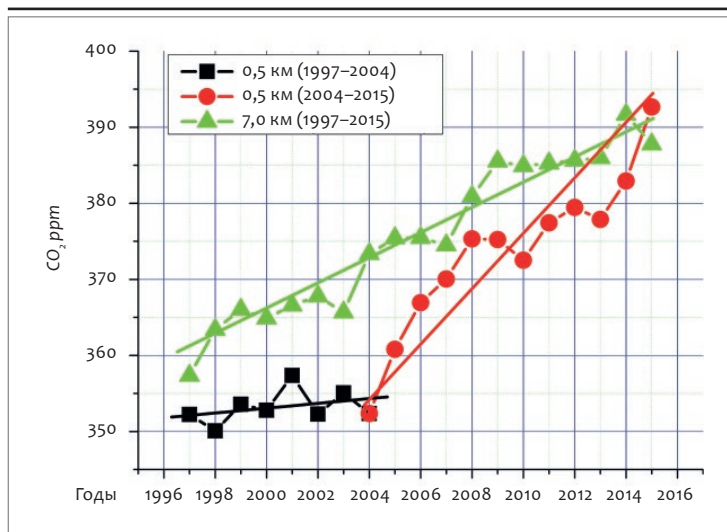


1. Самолет-лаборатория «Оптик» с летным отрядом.
2. Члены летного отряда во время стоянки в Архангельске.

поглощают углекислый газ; соответственно, зимой концентрация CO_2 над лесами увеличивается. Так вот, если до 2004 г. эти минимальные (летние) концентрации в среднем почти не изменялись, то начиная с 2005 г. наблюдается их рост. Очевиден устойчивый тренд — рост углекислого газа из года в год, если не брать в расчет небольшие от года к году флуктуации. Причем скорость этого роста существенно больше, чем рост эмиссии диоксида углерода в мире, то есть среднеглобальный рост. Поэтому складывается впечатление, что уменьшилось именно поглощение CO_2 лесами. Но, может быть, это связано с подстилкой в лесах, где тоже свое биоразнообразие, на активность которого могут влиять, например, участвовавшие пожары. Хотя прямой корреляции с пожарами мы не обнаружили.

Почему это произошло, почему экосистема, связанная с бореальными лесами, стала меньше поглощать CO_2 в самый вегетивно активный период, то есть летом, — это пока загадка. Для ее решения нужно привлекать лесоведов и почвоведов, продолжать мониторинг, выяснять, почему происходит такой рост. Сегодня мы уже проверили корреляцию с лесными пожарами, вырубками, засухой, но явной взаимосвязи ни с одним из этих факторов не обнаружили. Поэтому пока остается гипотеза, что это связано все-таки со снижением поглощательной способности лесов.

— **Расскажите подробнее о самом самолете Ту-134 «Оптик». Сколько человек на борту во время экспедиций, сколько длится полет?**



Резкое увеличение скорости роста CO_2 над лесами Западной Сибири после 2004 г.

— Наш летный отряд состоит из 25 человек. Упомянутая экспедиция по всем шести морям заняла 42 часа летного времени, около полутора недель. Мы стараемся летать каждый месяц, но обходится это дорого и, конечно, регулярность полетов зависит от финансирования. Один час полета на Ту-134 «Оптик» стоит более 370 тыс. рублей, и это только расходы на горючее. К счастью, нам помогают французские и японские коллеги, которые заинтересованы в изучении климатических процессов, происходящих над Сибирью, ведь Сибирь — это крупный климатообразующий регион.

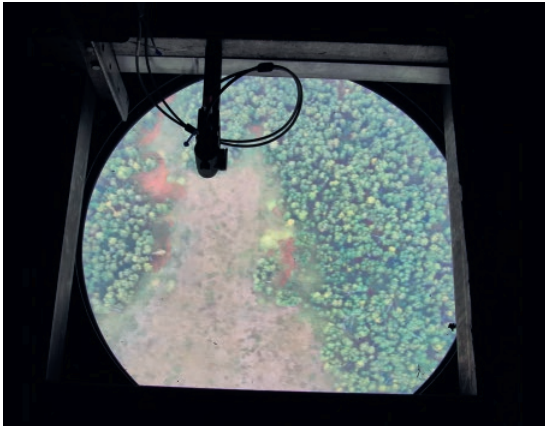
Нынешнее воздушное судно Института оптики атмосферы арендует уже десять лет; ранее оно принадлежало другому владельцу. Наш самолет рассчитан на 40 лет работы, и этот срок, к сожалению, уже подошел к концу, с 2020 г. самолет должен ежегодно проходить аттестацию для продления полетов. В любой момент он может не пройти сертификацию — и этот многолетний проект остановится. Чтобы продолжать исследования, нам, конечно, нужен новый летательный аппарат.

— **Как пандемия COVID-19 отразилась на работе ученых?**

— Наша экспедиция проходила в трудных условиях, потому что это был сентябрь 2020 г., самый разгар пандемии. У отряда возникли трудности организационного характера, которые, надо сказать, были успешно преодолены летным коллективом. Добавилась необходимость постоянно сдавать ПЦР-тесты, и иногда это приходилось делать в самых неожиданных местах, в самых разных аэропортах. Кроме того, северные аэропорты, как правило, работают «по регламенту»: начинают принимать самолеты с девяти утра и заканчивают в пять вечера. Суббота и воскресенье — выходные. Поскольку наш полет по морям проходил с запада на восток, к полетному времени добавлялась поясная разница в часах и это сокращало полетный рабочий день. В некоторых аэропортах не было горючего, чтобы заправиться. В общем, мы столкнулись с целым рядом организационных сложностей, но оно того стоило — ведь сам полет оказался очень интересным и совершенно особенным.

— **Какие еще параметры, кроме концентрации двуоксида углерода и метана, мониторит команда во время полета?**

— Мы измеряем профили концентраций нескольких газов, как я уже упоминал, это



Фотолюк для лидарных наблюдений

H_2O , CO_2 , CH_4 , CO , SO_2 , NO , NO_2 и O_3 . Измеряются также параметры аэрозоля, концентрации трех фракций аэрозоля от 3 нм до 30 мкм, проверяем химический состав органической и неорганической составляющей аэрозоля, сажу. ГНЦ «Вектор» регистрирует в пробах биоаэрозоль. В ходе экспедиции было показано, например, что концентрация аэрозоля уменьшается в среднем с запада на восток, что соответствует норме, поскольку основные источники находятся на западе. Было зафиксировано также, что содержание углекислого газа падает у поверхности моря, и это хорошо: наши северные моря по-прежнему поглощают CO_2 , как, в общем, и должно быть.

Кроме того, измерялись метеопараметры на разных высотах: температура, давление, влажность и т.д. Измерялось радиационное излучение от поверхности Земли. Этот параметр может служить источником информации, например, о вегетационном индексе. С помощью специального флуоресцентного лидара фиксировалось наличие планктона в поверхностном слое морей.

— Наша атмосфера со временем становится грязнее или нет? Что говорят ваши исследования о загрязнении воздуха?

— Тут два аспекта, которые нужно различать. Если говорить о «фоновой» атмосфере на Земле, то есть вдали от промышленных центров, то я думаю, что благодаря «экологической революции» 1970-х гг. в большинстве развитых стран атмосфера становится в целом чище, за исключением роста эмиссии парниковых

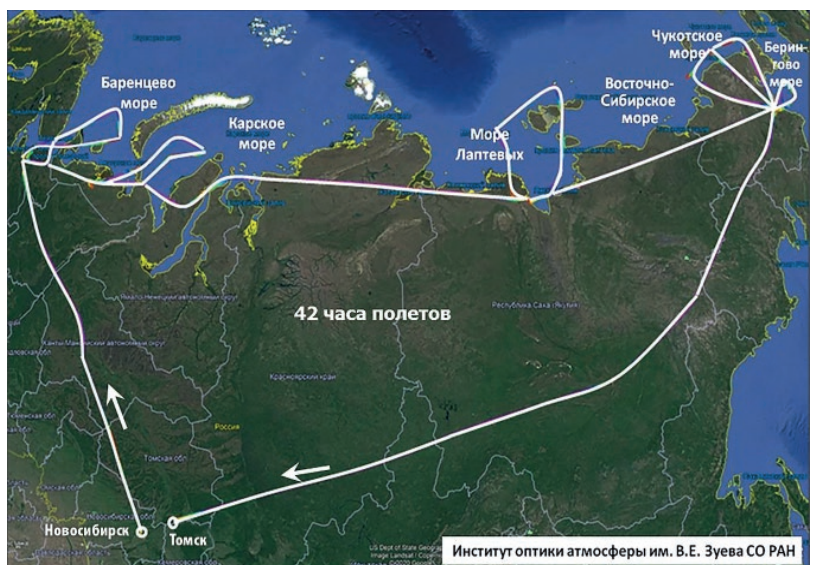
газов. В результате антропогенного влияния углекислый газ вырос с 300 ppm (миллионных долей в воздухе) до 400 ppm за последние 30 лет. И это один из основных факторов, который обуславливает глобальное потепление. Но атмосфера в отдельных городах, например, Сибири, стала заметно грязнее. Это другая сторона вопроса, и тут нужно принимать серьезные меры.

— Возможно ли четко разделить антропогенный и природный факторы, влияющие на рост того или иного газа? Как не перепутать одно с другим?

— В отдельных случаях это возможно. Есть газы, которые на 70–80% однозначно антропогенные. Это прекрасно известно, и в естественном состоянии в природе их очень мало: например, фтор, хлор- и бромсодержащие фреоны, угарный газ и т.д. Хлорсодержащие фреоны и вообще хлор в атмосфере на 80% имеют антропогенное происхождение.

— Что насчет метана и углекислого газа? Здесь мы тоже можем отличить природный газ от антропогенного?

— Конечно, метан и CO_2 как содержатся в атмосфере естественным образом, так и выделяются человеком. Но антропогенный углекислый газ и метан имеют, как правило, другой изотопный состав, он более легкий. Не вдаваясь в подробности, скажу, что при сжигании природных ископаемых (торфа, каменного угля, нефти, газа) образуется основной, легкий изотоп CO_2 и по изменению соотношения в атмосфере легкого и тяжелого изотопа можно



Маршрут полета самолета-лаборатории «Оптик» над морями Арктики в сентябре 2020 г.

оценивать антропогенную эмиссию диоксида углерода в атмосферу, обусловленную сжиганием природных ископаемых.

— **Можно сказать, что мониторинг, который вы ведете на территории Арктики и Сибири, ставит диагноз. А как лечить болезнь?**

— «Лечение» было предложено международным сообществом еще несколько лет назад и закреплено в Парижском соглашении об изменении климата. Этот всемирно известный документ был подписан подавляющим числом стран. Основные действия, которые в этом плане может предпринять человечество, — это уменьшать долю углеродной энергетики, то есть сокращать использование любых источников энергии, которые приводят к значительному выделению углекислого газа и метана в атмосферу. Было наглядно показано, что эти меры реально могут снизить объем выделения вредных газов, соответственно, уменьшить скорость роста температуры и, возможно, не допустить рост средней глобальной температуры до двух градусов по сравнению с преиндустриальным периодом. Но удастся ли это сделать? Пока что есть сомнения.

Важно понимать, что увеличение средней глобальной температуры на два градуса по сравнению с преиндустриальным периодом может серьезно повлиять на десятки миллионов людских жизней. Причем по иронии судьбы будут страдать жители малоразвитых регионов, таких, например, как Африка, которые меньше всего ответственны за этот антропогенный рост углекислого газа в атмосфере. Глобальное потепление ведет к повышению уровня океана,

затоплению определенной части суши. Но парадокс в том, что это будет хоть и относительно небольшая, но жизненно важная для жителей бедных стран часть суши, поскольку это те самые несколько процентов суши, где получают наибольший урожай риса и других культур, и с этого урожая кормятся около 50% населения Земли. Поэтому последствия изменения климата ударят в первую очередь по наиболее бедным странам, а ресурсов, чтобы справиться с этими последствиями, у них нет.

— **Насколько Россия вписывается в мировой тренд декарбонизации?**

— Не секрет, что наша страна живет в основном за счет нефти и газа. Исторически так сложилось, что углеводородное топливо стало нашим основным источником энергии. Мы его и экспортируем, и сами активно используем. Поэтому, конечно, в вопросах декарбонизации Россия пока сильно отстает от других развитых стран мира.

Нам нужно совершенствовать технологии безуглеродной энергетики, и здесь особое внимание стоит обратить на атомную энергию, в освоении которой Россия уже имеет большой опыт. Конечно, аварии в Чернобыле и Фукусиме в какой-то степени поставили под удар доверие мирового сообщества к атомной энергетике. Тем не менее специалисты, которые вплотную занимаются этим вопросом, в один голос говорят, что сегодня атомная энергетика уже в значительной степени безопасна и поэтому ставку стоит делать именно на атомные станции.

Кроме того, есть еще ветряная энергетика, которая в нашей стране пока совершенно не развита. Есть также солнечные



На борту самолета-лаборатории «Оптика»

батареи, и за последние 10–15 лет в Европе произошел значительный прорыв в их развитии и использовании. Сейчас солнечными батареями в Европе обставляется все начиная от домов и заканчивая административными учреждениями. Эффективность солнечных батарей выросла, а цена упала, так что на это направление обязательно стоит обратить внимание. Ну и есть надежда, конечно, на термоядерную энергетику, то есть термоядерный синтез.

— Говорят, что Мировой океан изучен очень плохо. А как обстоят дела с атмосферой?

— Я полагаю, что атмосфера Земли все же изучена гораздо лучше, чем океан, хотя, возможно, специалисты по атмосфере с этим не согласятся. Здесь мы уже на достаточном уровне освоили измерения, да и сама атмосфера более доступна для нашего изучения, чем океан с его глубинами и огромным давлением на этих глубинах.

Сегодня мы знаем много о нашей атмосфере. Есть специальные программы, которые моделируют ее глобальную циркуляцию, учитывая все больше и больше факторов, таких как поглощение солнечной радиации, перенос тепла, перенос воздушных масс, влияние океана и т.д. Есть большой массив измерений. Однако нерешенные вопросы остаются и здесь: например, аэрозоль, компонент атмосферы, который присутствует везде, но по-прежнему остается самым серьезным фактором неопределенности при расчете теплового баланса атмосферы.

Сотрудники нашего института совместно с коллегами из Финляндии сейчас исследуют новую гипотезу о том, что биогенные выделения растений — фитонциды — могут влиять на процесс аэрозолеобразования. Во многих регионах, в том числе в Сибири, зарегистрированы периодические всплески внезапного аэрозолеобразования (нуклеации): это частицы размером в десятки-сотни нанометров. И есть предположение, что это может быть обусловлено фитонцидами, которые выделяются растениями, и что процесс становится более и более активным в связи с ростом объемов CO_2 . Это аэрозолеобразование, в свою очередь, влияет на облакообразование и, соответственно, на климат. Есть и другие вопросы по аэрозолеобразованию и образованию некоторых типов облаков.



Вид на Чукотское море с борта самолета Ту-134 «Оптик»

— А какие еще есть неизученные явления в атмосфере?

— Мне на ум сразу приходят шаровые молнии, которые считались загадочным атмосферным явлением еще в моем детстве. Они и остаются таковыми по сей день. Общепризнанной теории о природе шаровых молний в мире до сих пор нет.

— Игорь Васильевич, подводя итоги, расскажите, пожалуйста, что ждет атмосферу Земли в будущем?

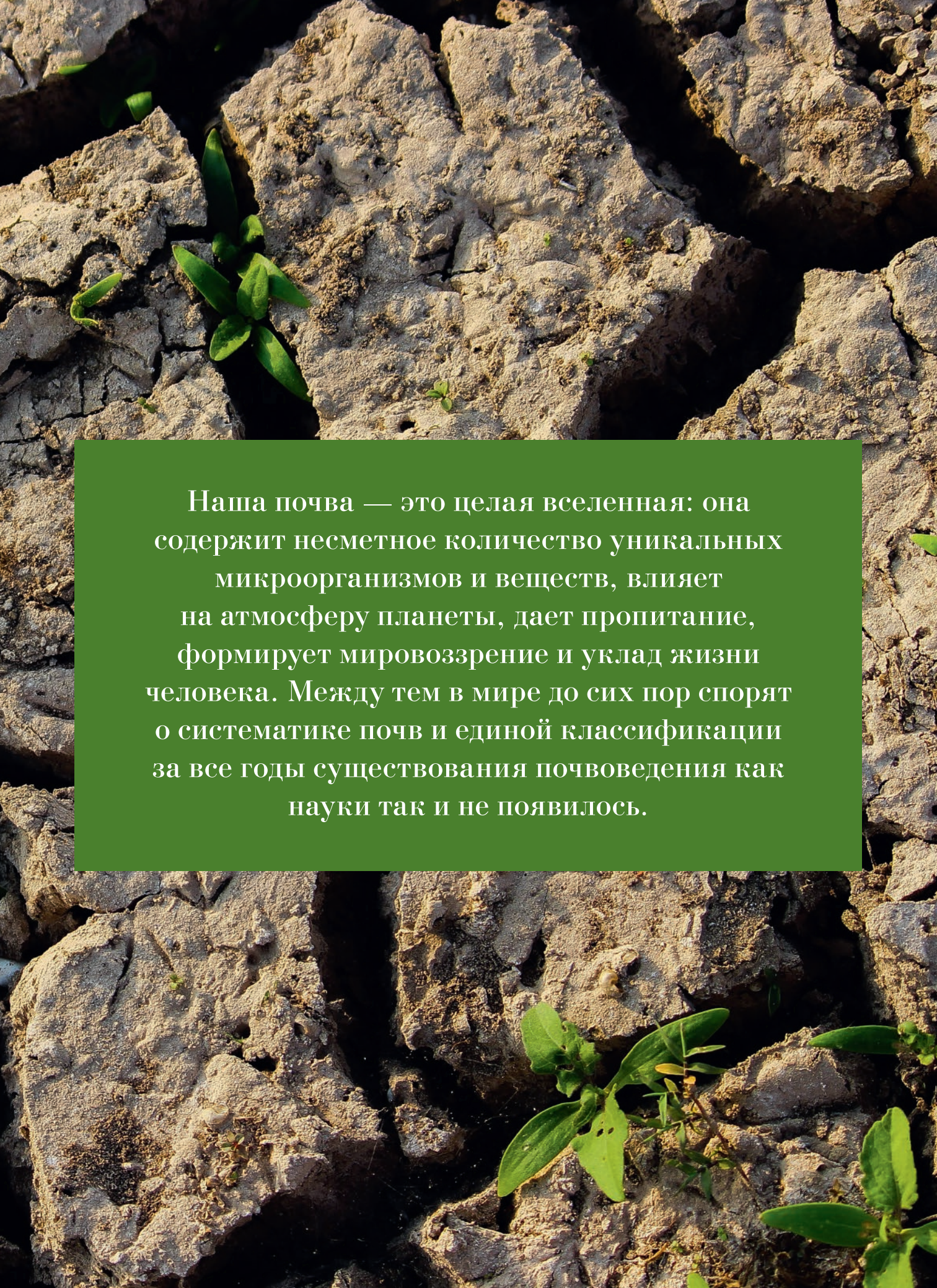
— Это во многом зависит от человечества. Если не брать в расчет такие возможные катаклизмы, как суперизвержение вулкана, крупный астероид или какие-то другие космические факторы, то в остальном все зависит исключительно от нас. Если мы остановим наше губительное воздействие на атмосферу парниковыми газами, затормозим рост глобального потепления, которое ничего хорошего нам не сулит, то, я думаю, мы вполне сможем еще тысячи лет жить в той прекрасной атмосфере, которую пока еще имеем сегодня.

Наша атмосфера уникальна, она способна очищаться от парниковых газов благодаря лесам и морям. Эта регенеративная способность очень ценна, особенно если мы говорим о будущем. Но на нынешнем этапе развития человечества его способности загрязнять атмосферу, да и биосферу вообще, настолько выросли, что атмосфера уже не успевает регенерировать сама. Очень важно учитывать это, когда мы строим планы на будущее. ■

Беседовала Янина Хужина

ПОЧВОВЕДЕНИЕ

ПОЧВА КАК ОСНОВА ЖИЗНИ



Наша почва — это целая вселенная: она содержит несметное количество уникальных микроорганизмов и веществ, влияет на атмосферу планеты, дает пропитание, формирует мировоззрение и уклад жизни человека. Между тем в мире до сих пор спорят о систематике почв и единой классификации за все годы существования почвоведения как науки так и не появилось.



Член-корреспондент РАН В.А. Рожков

Э

ти и многие другие темы мы обсудили с членом-корреспондентом РАН, главным научным сотрудником Почвенного института им. В.В. Докучаева **Вячеславом Александровичем Рожковым**.

— **Вячеслав Александрович, как почва связана с нашим менталитетом?**

— Почва была предметом исследования еще с древних времен. Этими вопросами люди стали интересоваться, когда начали вести оседлый образ жизни и заниматься земледелием, то есть более 600 лет назад. Точнее даже будет говорить не о почве, а о земле в целом. Впервые почвоведение как наука появилось в России, всем нам хорошо известны пионерские работы В.В. Докучаева в этой области. Наша наука почвоведение охватила весь мир с момента знаменитого выступления В.В. Докучаева, посвященного русскому чернозему, в 1893 г.

Что такое плодородие? Это сочетание природных климатических условий, и от этих условий зависят жизнестойкость нации и ее менталитет. Скажем так: в регионах с суровыми климатическими условиями люди становятся более выдержанными, стрессоустойчивыми и способными к выживанию. Климат, пища и почва отразились самыми важными последствиями в общей организации общества и породили многие из тех важных черт различия между народами, которые часто приписываются коренному различию человеческих пород. Английский историк Генри Томас

Бокль писал, что существует весьма тесная связь между климатом страны и произрастающей в ней пищей, пища же сама зависит от производящей ее почвы, а также от возвышения и понижения местности, состояния атмосферы — одним словом, от всех тех условий, совокупности которых обыкновенно дается название физической географии в ее обширном смысле.

Интересную мысль мы находим и у французского просветителя Шарля Луи де Монтескье: «Бесплодие земли делает людей избрательными, воздержанными, закаленными в труде, мужественными, готовыми к войне; они ведь должны добывать себе то, в чем им отказывает почва. Плодородие страны приносит им вместе с довольством изнеженность и некоторое нежелание рисковать жизнью».

— **В.В. Докучаев в свое время говорил, что чернозем дороже золота. А правда ли, что до сих пор точно не установлено, как появился наш уникальный чернозем?**

— Да, вопрос о том, как сформировался чернозем, остается открытым. Как и вопрос о том, как возникла жизнь на Земле. Есть разные предположения — вот так и с черноземом: то ли это осадки морского

дна, то ли результат тысячелетней деятельности степной растительности. Мы сегодня склоняемся, конечно, к степной версии. В степях в силу особых условий влажности и температурного режима мог сформироваться уникальный тип вещества. Чернозем богат питательным гумусом, но, надо сказать, и гумус для нас по-прежнему еще остается «вещью в себе». Считается, что это одно из сложнейших веществ на Земле. Нагрузка на гумусный слой почвы сейчас очень велика, и именно гумус дает значительную часть всего урожая, который вообще существует в мире.

Недаром немецко-фашистские захватчики тратили огромные средства и вагонами вывозили нашу землю, наш чернозем к себе в страну, ведь у них нет такого органического вещества, которое было бы столь же питательным.

Настоящий русский чернозем мы находим прежде всего на степных территориях. В целом чернозем на Кавказе и, скажем, в Забайкалье будут отличаться друг от друга, везде он разный. Но золотой фонд нашего чернозема составляют, безусловно, Ставрополье и Дагестан.

В России черноземы протянулись непрерывным поясом от Курска до Забайкалья общей площадью 80 млн га. В Дагестане и Ставрополье они служат эталоном продуктивности. Однако интенсивное использование привело к их существенной деградации. В послевоенный период и более позднее время было организовано в больших масштабах орошение без дренажа — мол, кашу маслом не испортишь. Погода в те годы стояла теплая, вода была в избытке, вот и решили наши аграрии поливать все, что видят. И что в итоге? Через год-два такого полива из-под грунта начали подниматься воды и вместе с ними соли. Соответственно, почвы выходили из строя, и это была большая трагедия. Как говорилось на одной конференции, вчерашние герои социалистического труда плакали и просились перевести их от стыда в другие хозяйства. Из-за подкисления стало необходимым известкование, применение удобрений. В периоды влажных лет на плакорах часто образуются мочары — локальные переувлажненные участки, исключаящие обработку земли.

— Чернозем — возобновляемый ресурс?

— К счастью, да. В нашей стране действует Рабочая группа по исследованию черноземов, организованная в Почвенном

институте им. В.В. Докучаева. По мнению ее специалистов, чернозем уникален тем, что за время формирования накопил такое плодородие в виде гумуса и структуры, которое мы не можем истратить и разрушить за века, используя в земледелии постоянные обработки. Сейчас мы просто проедаем то, что накопил чернозем. Но это возобновляемый ресурс, и если климатические условия не изменятся катастрофически, то его еще хватит надолго. Однако чернозем местами уже требует особых минерально-органических вложений (известкования и удобрений).

— Вы занимаетесь цифровой классификацией почв. Что это за направление?

— Для начала хочу отметить одну важную вещь: в мире нет классификации почв, а есть только списки и корреляции, но создавать их нужно целенаправленно, а не сгребая все, простите, в одну кучу.

Сейчас присутствует разнобой в систематике. Скажем, у американцев своя классификация, у англичан другая, а у нас в России третья. Классификацию почв нужно свести к цифровым значениям, и здесь без математики никуда. Когда вы, описывая определенный тип почвы, говорите, что он имеет светло-коричневый оттенок, то нужно иметь в виду, что есть люди, которым этот цвет кажется темно-коричневым, а есть и те, кто страдает дальтонизмом и не может различать цвета. И как тогда быть? Поэтому и нужен единый стандарт, созданный не на основе впечатлений, а такой, где все будет досконально просчитано и не останется места для субъективности. Цифровая классификация — это и есть та работа с цифровыми значениями, которой мы сейчас занимаемся. Мы хотим описать почву в числовых показателях. Наша цель — не просто набор цифр, а возможность определить значение признака, взятого за основание деления. У меня есть статья, которая называется «Классификация — не место для дискуссии». Может быть, это наиболее четкое определение современного состояния дел в почвенной систематике.

Любая классификация должна иметь конкретную цель, а сейчас пытаются вложить в нее генезис,



Василий Васильевич Докучаев (1846–1903) — русский геолог и почвовед, основоположник школы научного почвоведения и географии почв

плодородие, экономику. Так, в генетическую классификацию по природным свойствам включают антропогенно-преобразованные, городские почвы и др., а это ведет к нарушению логики, к неопределенности.

Наш выдающийся ученый Н.М. Сибирцев, один из учеников В.В. Докучаева, дал три разных классификации почвы: естественно-историческую, техническую (прикладную) и экономическую. Мы стараемся придерживаться такого подхода.

Классификация, основанная на общих представлениях, не годится. Нужно учитывать самые разные характеристики, то есть должен быть комплекс показателей. В рамках нашей работы это будут решения, которые принимаются на основе критериев, обоснованных многомерной статистикой и кластерным анализом.

— Сегодня мы располагаем большим выбором методов изучения почвы. А как вообще развиваются сейчас современные методы мониторинга и исследований?

— Почвоведение, безусловно, наращивает приборную базу. Кроме дистанционных

методов зондирования Земли, сменивших аэрофотосъемку, существуют и вышки с оборудованием для наблюдения за газовым режимом над почвой. Совершенствуется приборное оснащение. В последние годы как за рубежом, так и в отечественном почвоведении все чаще и шире применяется метод рентгеновской компьютерной томографии, позволяющий визуализировать и количественно характеризовать внутреннее строение почвы в образцах ненарушенного сложения.

— В своих выступлениях вы часто говорите о таком понятии, как память почвы. Что это значит?

— Память почв — это широкое понятие, включающее в себя главным образом след от биосферно-геосферно-антропоферных взаимодействий на землю. Есть характеристики почвы, которые сохраняются на протяжении десятилетий, например ее механический состав (почва-память), а есть те, что исчезают очень быстро, скажем, в течение дня (так называемый почва-момент), например кислотность. Разделены и характерные времена учета этих показателей.



Пожар в кедровом стланике, Сахалинский хребет, 1952–1958 гг. Фото предоставлено В.А. Рожковым.

Что нам дает знание о памяти почвы? В целом, возможно, не будет преувеличением сказать, что концепция памяти почв позволяет выявить еще одну глобальную функцию почв в природе и обществе, а именно информационную функцию почв.

Перспективным представляется также развитие количественных подходов в изучении информационной роли почв. В будущем, после завершения начального этапа в развитии концепции памяти почв, можно ожидать появления количественных разработок проблемы информационных функций почв и педосферы (*почвенной оболочки Земли. — Примеч. ред.*) в целом, где основные понятия и подходы будут тождественны базовым понятиям и подходам информатики.

— Какой максимальной глубины может достигать самый плодородный, питательный слой почвы?

— Сложно ответить однозначно, это зависит опять же от природных условий. Любые почвы отличаются друг от друга по минералогии: состав минералов там существенно различается. Так, например, дерново-подзолистые почвы Подмосковья весьма сильно отличаются от почв Кировской области. Питательный слой курского или рязанского чернозема может достигать полутора метров. Один из моих аспирантов, работая в Армении, фиксировал питательный слой с 4% содержания гумуса на уровне двух метров. А вот в Забайкалье плодородный слой совсем маленький, не составляет и полуметра.

— Вячеслав Александрович, вы не только известный почвовед, но и лесовод. Какие последствия, на ваш взгляд, имело сокращение лесничества в нашей стране?

— Сокращение полномочий лесничих в начале нулевых — это трагедия, последствия которой сейчас выражаются главным образом в многочисленности и обширности лесных пожаров. Многие лесники-обходчики жили в лесу или близко к нему, а значит, могли всегда своевременно остановить возгорание, буквально затоптав его. В распоряжении государственных лесничих были свои средства пожаротушения, свои пожаро-химические станции, но самое главное — возможность потушить пожар еще в зачатке. Они занимались также заготовкой дров, санитарной обработкой леса, охраной лесных территорий и т.д. Лесники работали на лесные хозяйства, где был большой штат сотрудников, а сейчас

число таких хозяйств сократилось в разы. В целом начиная с 2000-х гг. мы потеряли более 20 тыс. лесников.

В 2000 г. были фактически упразднены Государственный комитет по охране окружающей среды и Федеральная служба лесного хозяйства, а в 2006 г. вышел новый Лесной кодекс. Итогом стало то, что уход за лесом передали в руки частных арендаторов территории, а государство (и лесничий, главный хранитель леса, стал просто инспектором. При этом огромное количество лесных территорий в России остаются вообще бесхозными: они не принадлежат арендаторам, не входят в зону их интереса, за этой землей попросту некому ухаживать.

Многие мои знакомые и друзья вышли из семей лесников. В 1960-е гг., например, на Камчатке и на Сахалине выпускники Лесотехнической академии им. С.М. Кирова (Ленинград) и других лесных вузов могли претендовать на должности не выше помощника лесничего. Видимо, как следствие, сократилась потребность в этих специалистах, что привело к уменьшению числа лесных учреждений: реорганизованы ДальНИИЛХ (Хабаровск), а сейчас и Московский государственный университет леса (МГУЛ). Закрыты все лесные опытные станции (ЛОС). Специальность стала невостребованной, и это тоже сыграло свою роль.

Наши леса — не только защита от водной и ветровой эрозии почв и посевов, но и индикатор состояния атмосферы, окружающей среды в целом. Раньше ведь считалось, что на здоровье нашей планеты, если мы говорим о лесах, влияют только тропики. Но затем в работах Н.И. Базилевич, в 1980-х гг., было впервые показано, что это не так: наши бореальные леса также определяют экологию территории.

— Грядет ли глобальное потепление, как вы считаете?

— Возможны разные сценарии. Мне, например, больше импонирует теория квантитативной компенсации Н.В. Тимофеева-Ресовского, согласно которой потепление в одних регионах земного шара непременно влечет за собой похолодание в других.

Конечно, нельзя исключать наше влияние, антропогенное воздействие, которое способствует вредному побочному выделению газа. Однако только распашка целины в 1954–1965 гг. отразилась на некотором

Глобальное изменение климата — а грядет ли оно?

Графики температур менялись слабо, как и погода

График 1



График 2

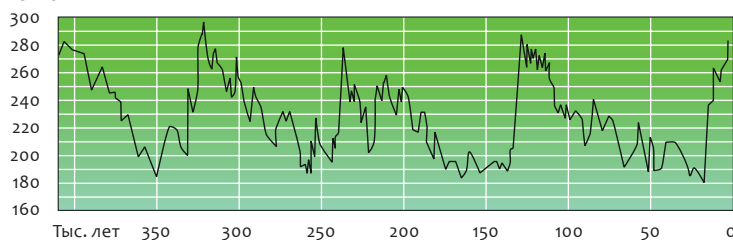


График 3

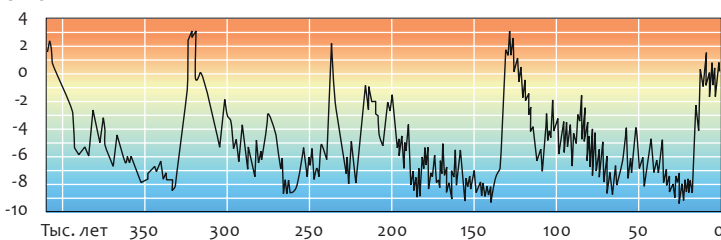
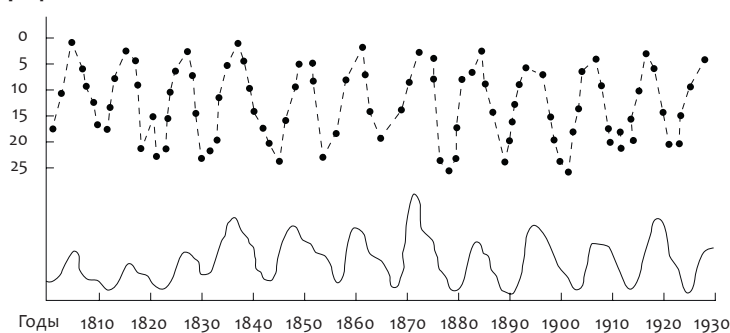


График 4



1. Изменение средних глобальных и континентальных температур.
2. Концентрация CO_2 в атмосфере (млн л) за последние 400 тыс. лет.
3. Отклонение температуры от нормального значения ($^{\circ}\text{C}$).
Источник: Станция «Восток», Антарктида.
4. Влияние планет Юпитера, Земли, Венеры и Меркурия на деятельность Солнца. Верхняя кривая — констелляция планет. Нижняя кривая — деятельность Солнца (по Филиппу Мальбурэ).

увеличении парниковых газов в атмосфере, то есть это лишь мизерная доля общего влияния, все остальное связано с космосом. Каждые 500 лет мы наблюдаем таяние снега в Арктике. В начале 1960-х гг. инженер П.М. Борисов выступал в Географическом обществе Ленинграда и Ленинградском университете с идеей постройки плотины через Берингов пролив для холодного течения. Тогда стала бы таять ледяная шапка Арктики. Или если засыпать ее золой — климат Севера стал бы теплым, и это было бы прекрасно! Теперь об этом не вспоминают. Наоборот. Забывают о том, что климат станет теплым, но почва не изменится так быстро! И в Сибири не стали бы расти бананы.

Последнее значительное потепление мы наблюдали относительно недавно, в 1929–1930-е гг. Многие номера журнала «Вокруг света» тех лет были посвящены потеплению и строительству города Певека. В те годы оттаял лед Северного морского пути, стали усиленно возводить города, а теперь многие из них пустуют. Никто не вспоминает о том потеплении, а оно было — и, по моему мнению, повторится еще не раз.

Если глобальное потепление действительно грядет, то для почвы это не сулит ничего хорошего: поймы рек где-то пересохнут, а где-то, наоборот, будут залиты водой. Помню, как на 25-й съезд КПСС в 1976 г. из Коми присылали делегата-почвовед с протестом против переброски рек с севера на юг. Тогда были бы залиты водой самые плодородные пойменные почвы республики. В общем, это сложный вопрос.

Мы с вами говорили еще о лесе, и здесь тоже есть еще одна проблема, которая вносит свой вклад в потепление, — это валежник. За счет разложения подстилки, валежника, сухостоя в атмосферу выделяется углекислота. А как много этого валежника лежит по всей территории наших лесов! Он гниет, и достаточно сильно, то же самое касается и кустарников. Эту проблему тоже могли бы частично решить лесники, но, как я уже говорил, их практически не осталось.

Бабушка моей жены, испокон веков жившая на берегу Волги в Тверской области в деревне Креве, рассказывала, как в довоенные годы к ним в деревню приезжал председатель ЦИК СССР М.И. Калинин — вручал медаль за доблестный труд. Бабушка тогда его попросила: «Разрешите нам валежник брать из леса», на что Калинин коротко ответил: «Позабочусь». Но только

1. Типичный подзол Карелии. Фото предоставлено В.А. Рожковым.
2. Существуют разные гипотезы происхождения чернозема: морская, болотная, версия о растительно-наземном происхождении и др. Фото: <https://ru.123rf.com>.



в 2019 г. местному населению разрешили бесплатно собирать валежник! А ведь здесь дело не только в выделении углекислоты из валежника, но и в том, что очистка леса от сухостоя и пней снижает вероятность лесных пожаров и поражения деревьев вредителями.

— Состояние земельных ресурсов сегодня вызывает тревогу?

— Несомненно. Повсюду на территории России мы наблюдаем неуклонное снижение естественного плодородия земли и деградацию земель. Причины тому — эрозия почвы, засоление и, конечно, техногенный фактор. В среднем по стране, как отмечал мой коллега Д.С. Орлов, за последние 25 лет на 0,5% уменьшилось содержание гумуса в почвах. По-прежнему сохраняется дефицит фосфора, калия, кальция и других элементов. Сегодня пустуют 76 млн га пашни.

— Какие регионы России наиболее уязвимы, если мы говорим о почве?

— Любая почва в той или иной степени может быть уязвимой, да и вообще это довольно условное понятие. Например, половина нашей средней полосы России относится к промерзающим почвам. Другие земли, на юге, в Предкавказье и Поволжье, подвержены пересыханиям — аридная зона. Поэтому к каждому типу почвы нужен свой отдельный подход.

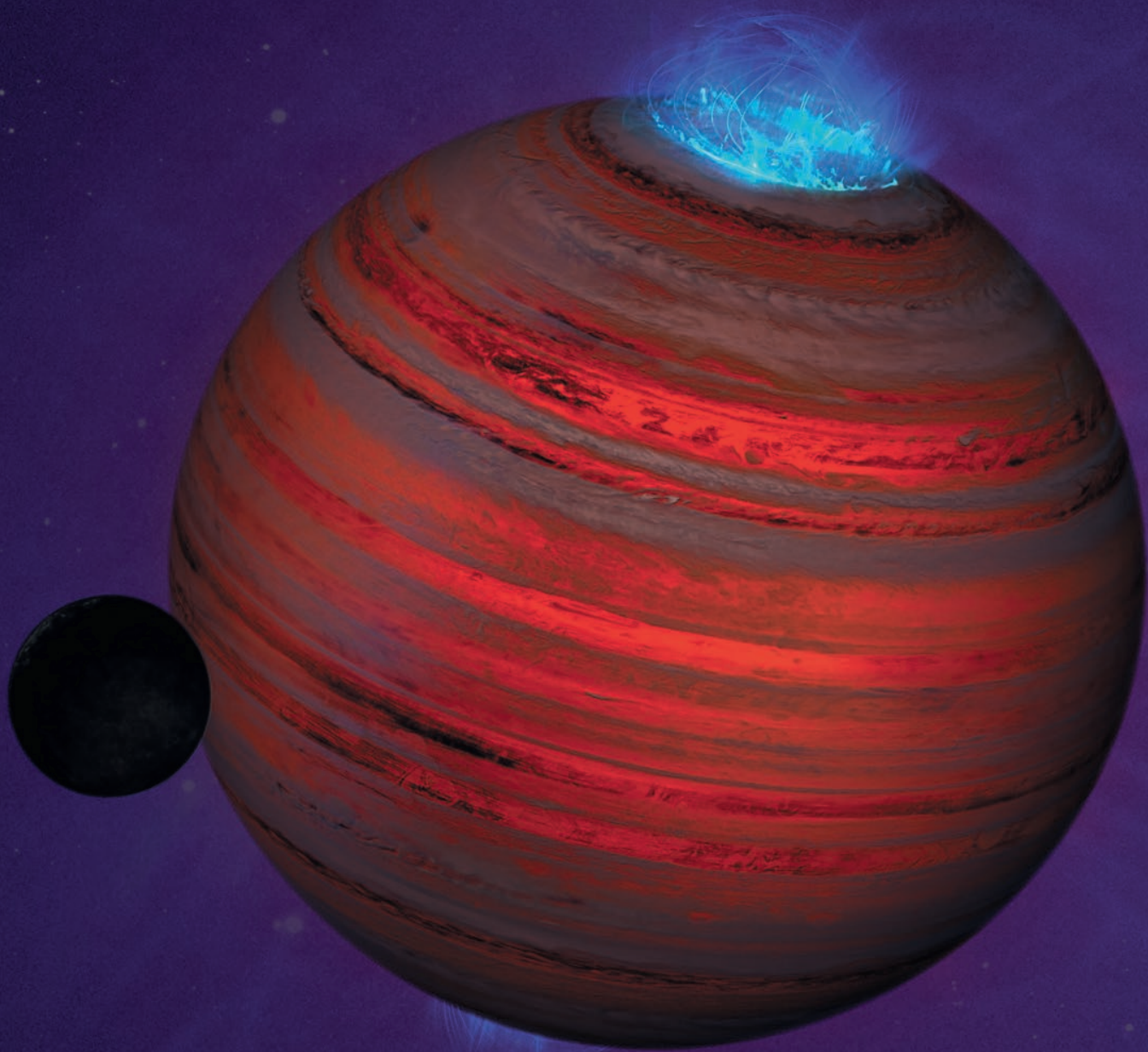
Многое зависит от условий того или иного конкретного года. Примерно каждые восемь лет мы наблюдаем то сухой период, то период повышенной влажности, когда

даже на ровных черноземах, например в Рязанской и Курской областях, появляются так называемые воронки — скопления воды. В результате появления таких водяных воронок большие площади земли уходят из оборота.

Еще одна проблема — засоленные почвы, от Поволжья и восточнее. Засоленные почвы мы видим также в Средней Азии, Якутии, и, если их полив сделан неправильно, без дренажа, есть риск лишиться этих почв.

В Почвенном институте им. В.В. Докучаева проводились опыты по мелиорации почв и в целом по изучению и сохранению почвенного покрова. Наш институт воспитал в Средней Азии мощную когорту ученых, докторов наук, которые там управляют довольно хорошо, но ведь многое зависит от конкретных природных условий. ■

Беседовала Янина Хужина



АСТРОНОМИЯ

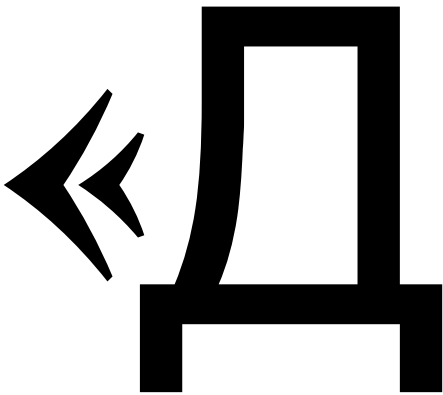
Не совсем звезды

Коричневые карлики располагаются где-то
посередине между звездами и планетами
и поэтому способны помочь нам разгадать
загадки и тех и других

Кейтлин Аллерс

ОБ АВТОРЕ

Кейтлин Аллерс (Katelyn Allers) — астроном, область исследований которой — звезды малой массы и коричневые карлики. До недавнего времени была профессором Бакнеллского университета. В настоящее время выпускает цифровые обучающие материалы в компании Northwest Registered Agent.



ыши, дыши», — повторяла я про себя, как мантру. На высоте 5,6 тыс. м мой организм жаждал кислорода, и мне пришлось сосредоточиться на том, чтобы доставить в легкие достаточно воздуха. Я находилась на вершине Серро-Токо, стратовулкана, с которого открывается вид на чилийское плато Чахнантор, где сегодня расположилась Атакамская большая антенная решетка миллиметрового/субмиллиметрового диапазона — один из ведущих в мире радиотелескопов. Разреженный воздух и бесплодная красная поверхность горы создавали впечатление, что я на Марсе. Мы с коллегами изучали атмосферные условия на Серро-Токо. Если бы они оказались достаточно хорошими, можно было бы обосновать строительство обсерватории на столь отдаленной высокогорной площадке, даже учитывая значительные связанные с этим технические проблемы.

Атмосфера Земли — серьезная помеха для астрономов, а облака и подавно расстраивают наблюдателей. Атмосферная турбулентность «размазывает» свет от звезды, и, когда звезды видны вблизи горизонта, нам кажется, что они «танцуют» и мерцают. Содержащиеся в атмосфере молекулы, такие как водяной пар и углекислый газ, поглощают излучение звезды, особенно инфракрасное. Поскольку больше половины воздуха атмосферы Земли находится ниже вершины Серро-Токо (момент, на который неоднократно обращали внимание мои пылающие легкие), мы надеялись, что с помощью специального инфракрасного телескопа наверху можно будет сделать множество новых потрясающих открытий.

Жажда приключений, приведшая меня к этой вершине, зажгла искру и моего увлечения инфракрасной астрономией — областью, в которой ученые исследуют космос в свете, слишком красном для человеческого глаза. Инфракрасное излучение большей частью исходит от самых тусклых и самых далеких

из наблюдаемых нами объектов. Один из классов объектов, лучше всего заметных в инфракрасном диапазоне, — коричневые карлики. В начале 2000-х гг., когда я училась в аспирантуре, они были только что обнаружены и принесли с собой много удивительных загадок. Я была очарована этими поразительными небесными телами, которые в астрономической классификации занимают промежуточное положение между звездами и планетами. Мне было любопытно, где и как они образовались и на что похожи. В ходе своих исследований я узнала, что коричневые карлики не только интересны сами по себе, но и служат важным мостом к нашему пониманию как планет, так и звезд, поскольку их температуры и массы занимают промежуточное положение в этом ряду небесных тел. Сейчас я и другие астрономы, занимающиеся изучением коричневых карликов, работаем в одной из самых перспективных областей исследований — еще много коричневых карликов ожидают своего обнаружения, при этом, чтобы раскрыть новые

детали физических процессов, идущих в этих объектах, мы можем опираться на богатство материалов предыдущих исследований. У нас наконец-то появились приборы для изучения, например, атмосферы коричневых карликов, дующих на них ветров и скорости их вращения, а также для того, чтобы попытаться выявить, есть ли у них собственные планеты.

Промежуточные объекты

Большинство звезд получают энергию за счет реакции синтеза, превращающей водород в гелий, — удивительно стабильного процесса, благодаря которому горение звезды происходит при одинаковой температуре и светимости в течение миллиардов лет. Но если формирующаяся звезда не достигает достаточно высокой температуры или давления, чтобы поддерживать синтез водорода, рождается коричневый карлик, чья максимальная масса составляет 8% от массы нашего Солнца, то есть примерно в 80 раз больше массы Юпитера.

Недавние исследования показывают, что коричневые карлики распространены почти так же, как и звезды, они есть повсюду. Коричневые карлики обнаружены в звездных яслях вместе с молодыми протозвездами. Они найдены в двойных системах в паре с белыми карликами, где избежали опасности поглощения красным гигантом — предшествующей формой белого карлика. (Наше Солнце, желтый карлик, однажды превратится в раздувшийся красный гигант, а после того как тот умрет, станет белым карликом.) Некоторые из соседних с нашим Солнцем звездных систем — коричневые карлики, это третья и четвертая ближайšie к нам звездные системы, находящиеся соответственно на расстоянии 6,5 и 7,3 светового года (а самые близкие — это Альфа Кентавра и звезда Барнарда). И все же, несмотря на вездесущность коричневых карликов, большинство людей никогда о них не слышали.

Хотя в недрах коричневых карликов термоядерная реакция синтеза не идет, они светятся — излучают в инфракрасной области благодаря теплу внутри них. Сначала они относительно горячие (около 3 тыс. градусов Кельвина), а в течение последующих миллиардов лет остывают и меркнут. Коричневые карлики не умирают, они уходят в вечность, остывшая и все больше тускнея. Самый холодный из известных коричневых карликов показывает температуру ниже точки замерзания воды. Поскольку они настолько холодны, большая часть испускаемого ими излучения лежит в инфракрасной области. Они слишком тусклые, чтобы невооруженным глазом можно было разглядеть их на нашем ночном небе, но, если бы

мы могли взглянуть на них вблизи, они, вероятно, имели бы тусклый оранжево-красный или пурпурный оттенок.

За более чем два десятилетия, прошедшие с тех пор, как астрономы начали изучать коричневые карлики, сложилась достаточно четкая картина их основных характеристик. Как и наше Солнце, коричневые карлики почти полностью состоят из водорода. Однако температура в верхних слоях их атмосферы довольно низкая, поэтому могут образовываться различные молекулы. Признаки водяного пара наблюдаются почти у всех коричневых карликов. По мере дальнейшего охлаждения химический состав их атмосферы изменяется и начинают преобладать другие молекулы и облака. Эволюция атмосферы коричневого карлика зависит от его массы и возраста. Представьте, например, коричневый карлик, масса которого в 40 раз больше массы Юпитера. В течение первых 100 млн лет состав его атмосферы схож с составом атмосферы красного карлика, в которой присутствуют окись титана и закись углерода. В промежутке между 100 и 500 млн лет атмосфера остынет и образуются пылевые облака из таких минералов, как энстатит и кварц. Спустя примерно миллиард лет после этого облака распадутся и оседут, а преобладающим типом молекул в верхних слоях атмосферы станет метан. Самый холодный из известных коричневых карликов демонстрирует свидетельства присутствия в его атмосфере облаков из кристаллов воды, а также водяного пара и метана. Мы полагаем, что его атмосфера содержит значительное количество аммиака, подобно тому, что мы наблюдаем на Юпитере.

Однако за исключением перечисленных свойств мы еще мало что знаем о коричневых карликах. Загадочная природа этих небесных тел породила ряд ярких идей. Например, одно время коричневые карлики считались возможным резервуаром темной материи, хотя от этой идеи быстро отказались, когда стало ясно, что коричневые карлики излучают свет (то есть они не темные) и что их вклад в общую массу нашей Галактики не очень велик. А недавно ученые предположили, что в прохладных верхних областях атмосферы коричневых карликов может зародиться жизнь, — идею, которую эксперты по коричневому карликам быстро похоронили, потому что динамика атмосферы такова, что любая форма жизни перемещалась бы в ее более глубокие слои — а они горячие и непригодны для жизни.

А еще раньше, в 1995 г., родился миф о «катаклизме Нибиру»: липовое пророчество, предрекавшее неминуемую катастрофу от столкновения Земли с коричневым карликом. Астрономы

Путеводитель по коричневым карликам

Разбросанные по всему космосу коричневые карлики — это тусклые и компактные объекты, отчасти похожие на звезды, отчасти на планеты. С массой как минимум в 13 раз больше Юпитера, но менее 80 Юпитеров, они занимают свою собственную нишу. Новое исследование процессов их формирования, их атмосферы и многого другого помогает пролить свет на эти странные, занимающие промежуточное положение небесные тела.

СОЛНЦЕ, ЖЕЛТЫЙ КАРЛИК

Радиус: 696 тыс. км
Масса: 1050 масс Юпитера

ПРОКСИМА КЕНТАВРА, КРАСНЫЙ КАРЛИК

Радиус: 107 тыс. км
Масса: 130 масс Юпитера

PSO J318.5-22, КОРИЧНЕВЫЙ КАРЛИК

(спектральный класс L)
Радиус: 105 тыс. км
Масса: 8,3 массы Юпитера

WISE 0855, КОРИЧНЕВЫЙ КАРЛИК

(спектральный класс Y)
Радиус: 72 тыс. км
Масса: 3–10 масс Юпитера

ЮПИТЕР ПЛАНЕТА — ГАЗОВЫЙ ГИГАНТ

Радиус: 71,5 тыс. км

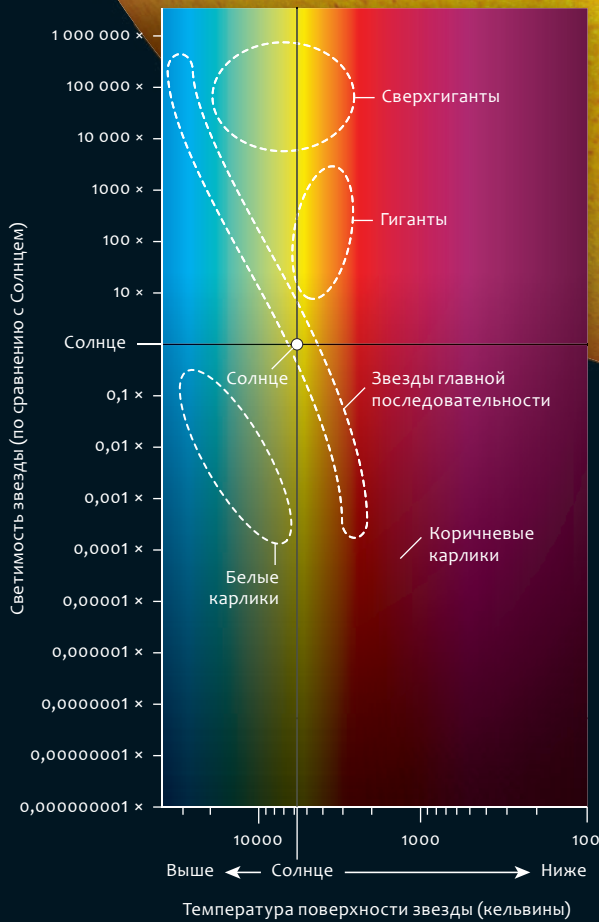


Диаграмма Герцшпрунга — Рассела

Этот график зависимости светимости от температуры звезды, называемый диаграммой Герцшпрунга — Рассела, применяется как классический инструмент астрономов для характеристики классов звезд. Справа внизу коричневые карлики, которые представляют более холодную и тусклую категорию, чем любой другой из показанных типов звезд.

ВНУТРЕННИЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

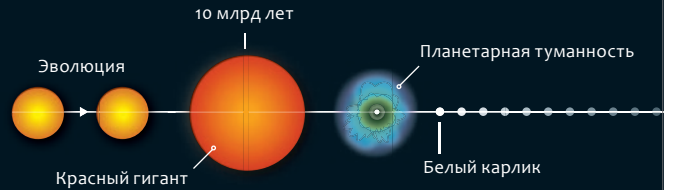
Звезды получают энергию за счет водородного синтеза, однако коричневые карлики слишком малы, чтобы поддерживать этот процесс. Вместо этого они светятся за счет остатков тепла, выделившегося при их образовании. Такие планеты, как Юпитер, в дополнение к излучению за счет собственного тепла отражают излучение своей родительской звезды.

АТМОСФЕРА

У звезд, планет и коричневых карликов свои собственные особенности атмосферы. Недавно ученые выяснили, что коричневый карлик проходит несколько стадий. Сначала его атмосфера напоминает атмосферу красного карлика. По мере того как он стареет и остывает, могут образовываться облака из минералов, а позднее в течение его жизни эти облака тонут и верхние слои его атмосферы становятся похожими на атмосферу газового гиганта.

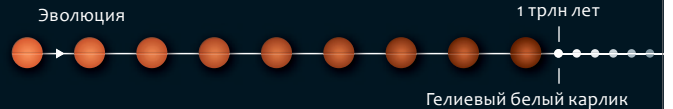
ЖЕЛТЫЙ КАРЛИК (ЗВЕЗДА)

Наше Солнце — один из желтых карликов. Эти звезды превращают водород в гелий в течение примерно 10 млрд лет, пока большая часть водорода не закончится. Затем они раздуваются в более крупные и более красные звезды — красные гиганты, которые превращают гелий в углерод и другие более тяжелые элементы. В конце концов у них заканчивается топливо для ядерного синтеза и они сбрасывают свои внешние газовые слои, образуя сияющие планетарные туманности, в то время как их ядра схлопываются в плотные и горячие белые карлики.



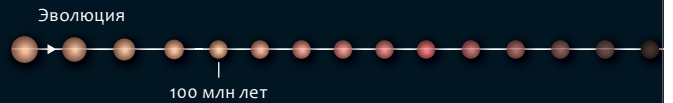
КРАСНЫЙ КАРЛИК (ЗВЕЗДА)

Самый распространенный на сегодня тип звезд в Млечном Пути — красные карлики. Они тусклее и холоднее, чем звезды, подобные Солнцу. Они тоже превращают водород в гелий, но стареют гораздо медленнее, чем желтые карлики, и могут прожить триллион лет, прежде чем закончится водород. Когда в конце концов они все же исчерпают свое топливо, они тоже становятся белыми карликами.



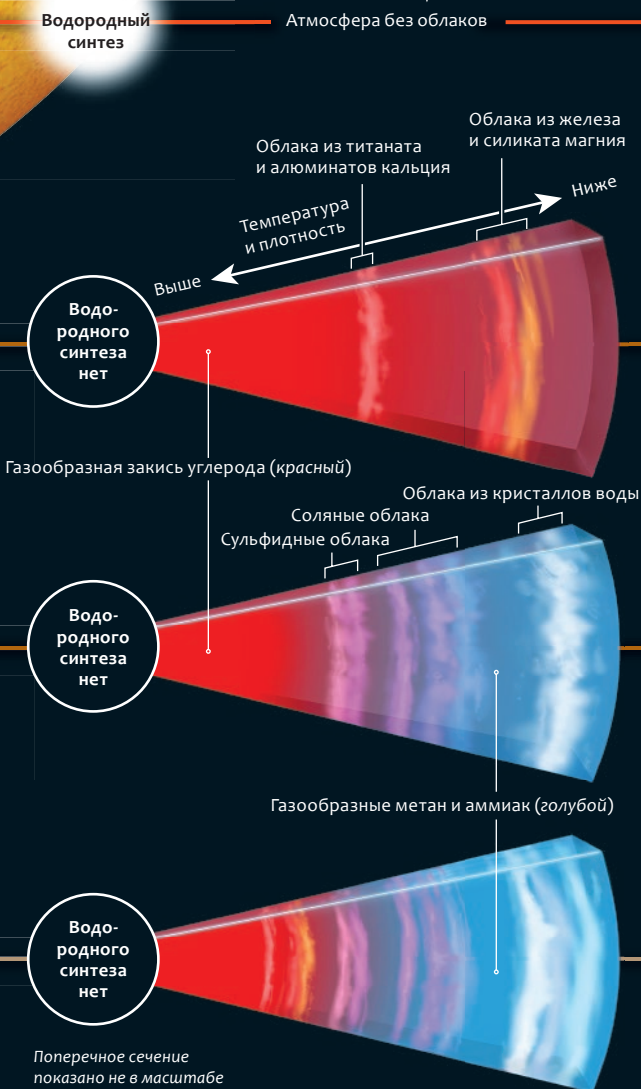
КОРИЧНЕВЫЙ КАРЛИК

Эти небесные тела — не звезды, потому что их масса слишком мала, чтобы создать давление, достаточное для протекания ядерного синтеза. Они сияют остатками тепла, возникшего при рождении, и со временем постепенно остывают и тускнеют. Они никогда не умрут и не превратятся в тела другого типа, а просто будут становиться все холоднее и темнее.



ГАЗОВЫЙ ГИГАНТ (ПЛАНЕТА)

В отличие от звезд и коричневых карликов, которые формируются в результате конденсации газового облака, планеты вырастают вблизи недавно родившейся звезды из остатков вещества, образовавших вокруг нее протопланетный диск. Газовые гиганты Юпитер и Сатурн — самые большие планеты Солнечной системы и состоят в основном из водорода и гелия. Как и у коричневых карликов, в ядрах газовых гигантов ядерный синтез не протекает.



были бы очень рады увидеть коричневый карлик вблизи, но никаких научных доказательств, подтверждающих такого рода сценарий конца света, не существует, а коричневый карлик был бы замечен за сотни или даже тысячи лет до любой близкой встречи.

Первые коричневые карлики

Существование коричневых карликов ученые предсказали в 1960-х гг., основываясь на том, что было известно о механизмах формирования звезд и планет. Небесные тела этой промежуточной категории, по всей видимости, должны были существовать, но на небе таких объектов астрономы не находили. Просто оказалось, что коричневые карлики очень и очень тусклые и основная часть их излучения лежит в инфракрасной области. А инфракрасная техника делала лишь свои первые шаги и еще не была готова для решения этой задачи. И вот наступил 1995 г., очень значимый для астрономии. В тот год астрономы Мишель Майор (Michel Mayor) и Дидье Кело (Didier Queloz) обнаружили 51 Пегас *b*, первую экзопланету, обращающуюся вокруг обычной звезды. Что еще важнее, по крайней мере для автора этой статьи, — тогда же были открыты первые коричневые карлики.

Тейде 1 был обнаружен в известном звездном скоплении Плеяды. Астрономы Рафаэль Лопес (Rafael Rebolo López), Мария Роса Сапатеро-Осорио (María Rosa Zapatero-Osorio) и Эдуардо Мартин (Eduardo L. Martín) впервые заметили его на фотоснимках с 0,80-метрового телескопа обсерватории Тейде на Канарских островах. Объект был молодым и еще слегка светился благодаря теплу, возникшему при его рождении. Открывшие коричневый карлик ученые наблюдали в его атмосфере следы нескольких молекул, в том числе лития. Звезды обычно сжигают литий сразу же, как только рождаются, а значит, это важное открытие доказывало, что ядерный синтез там не идет. Они опубликовали свои результаты в сентябре 1995 г.

Спустя два месяца астрономы объявили об открытии второго коричневого карлика — Глизе 229 *B*, спутника другой звезды. Группа астрономов из Калифорнийского технологического института и Университета Джонса Хопкинса впервые увидела объект на инфракрасном изображении с телескопа Паломарской обсерватории. Они сразу же поняли, что он странен. Объект был необычного цвета, и в его атмосфере присутствовали признаки метана. Для присутствия метана его атмосфера должна быть очень холодной, поскольку молекула с высокой реакционной способностью и при более высоких температурах обычно превращается в закись углерода. Более поздние

наблюдения показали, что коричневый карлик обладает примерно таким же размером, как Юпитер, диаметром около 129 тыс. км, но намного плотнее — его масса в 70 раз больше.

В 2000 г., когда я поступила в аспирантуру, было известно уже больше коричневых карликов, хотя и не так много. Я была занята созданием инфракрасных приборов, и мне нужен был объект для исследований. Мой научный руководитель занимался изучением формирования звезд, поэтому я решила искать коричневые карлики в областях звездообразования. В ходе работы над своей диссертацией я обнаружила большое количество коричневых карликов, в том числе несколько самых первых из тех, у которых масса близка к массе планет. В то время мы не имели представления о том, как эти штуковины образовались, и не знали, существует ли нижний порог их массы, но начали находить все более мелкие объекты.

В общей сложности моя диссертация содержала данные менее чем о 20 вновь открытых коричневых карликах, но это было значительным вкладом в их общее число. С тех пор с помощью новых приборов было найдено гораздо больше. Основной вклад внесли программа 2MASS (2 Micron All Sky Survey), работа по картографированию звездного неба в излучении с длиной волны 2 мкм, проведенная в начале 2000-х гг., и космический телескоп WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer, Широкоугольный инфракрасный обзорный телескоп), запущенный в 2009 г. На сегодня общее число обнаруженных коричневых карликов — около 3 тыс. Однако еще не открытых значительно больше: оценки говорят о 25–100 млрд коричневых карликов в Млечном Пути.

Сценарии формирования

Коричневые карлики как продукт звездообразования наименьшей массы предоставляют астрономам уникальный шанс углубить наше понимание основных этапов рождения звезд и планет. Звезды образуются в скоплениях газа (в основном молекулярного водорода) и пыли, известных как молекулярные облака. Если масса молекулярного облака достаточно велика, силы гравитации могут превозмошь давление газа и заставить облако сжиматься, или, как говорят, коллапсировать, в звезду. Во время коллапса любое небольшое вращательное движение в облаке усиливается, подобно тому как фигурист, прижимая руки к туловищу, начинает вращаться быстрее. Это вращение вещества облака приводит к образованию околосредного диска, окружающего зарождающуюся звезду, который затем становится местом формирования планет.

Когда коричневые карлики только лишь были обнаружены, астрономы предположили, что, возможно, они образовались в ходе процесса, аналогичного процессу формирования звезд, но были озадачены тем, как гравитации такой малой массы удалось преодолеть давление газа и вызвать коллапс. При написании этой статьи я просмотрела некоторые из старых предложений грантов и времени на телескопах, сделанные в самом начале моей карьеры, целью большинства из которых было прояснение механизма образования коричневых карликов. В то время существовало несколько конкурирующих идей. Некоторые теории предполагали нарушение процесса формирования звезды до того, как она окончательно нарастит свою массу. Может быть, что-то физически удалило коричневый карлик из его естественного окружения или выжгло молекулярное облако, оставив лишь карликовую звезду?

Другие гипотезы основывались на уменьшенной версии звездообразования или увеличенного масштаба версии образования планет. Это прекрасный пример использования множества возможных теорий для получения четких и поддающихся проверке результатов расчета. Когда мы обнаружили повсеместное присутствие вокруг коричневых карликов околозвездных дисков, определили распределение масс звезд и коричневых карликов в условиях различного окружения и вычислили орбиты коричневых карликов в двойных системах, стало ясно, что большинство коричневых карликов, по-видимому, сформировались как звезды более мелкого масштаба — из меньшего резервуара газа. А факт, что у коричневых карликов образуются околозвездные диски, повышает вероятность того, что у них есть планеты. Хотя мы никогда не видели ни одной из них наверняка, весьма вероятно, что планеты формируются в этих дисках, как и около звезд. Ученые надеются, что в ближайшие годы мы наконец получим надежное подтверждение того, что вокруг коричневых карликов обращаются планеты.

Недавно ученые обнаружили отдельные коричневые карлики с массами как у планет-гигантов (примерно в 13 раз больше массы Юпитера), что снова подняло вопрос, как они могли образоваться. Могли ли некоторые из этих коричневых карликов планетной массы возникнуть в околозвездных дисках более массивных звезд — другими словами, сформироваться точно так же, как планеты?

Чтобы проверить механизм образования планетоподобных объектов, мы с коллегами предложили провести наблюдения с помощью космического телескопа «Хаббл». Поскольку

«Хаббл» находится на орбите, не возникает размытие изображений и поглощение излучения атмосферой Земли, что делает его идеальным прибором для получения изображений двойных систем коричневых карликов. По данным этих наблюдений в 2020 г. мы обнаружили уникальную систему коричневых карликов, которая убедительно подтверждает подобный звездному механизм формирования сходных с планетами объектов. По космическим меркам система *Oph 98 AB* очень молода (3 млн лет), масса ее компонентов соответственно в восемь и 15 раз больше массы Юпитера. Эти объекты весьма малой массы находятся друг от друга на расстоянии в 200 раз большем, чем расстояние между Землей и Солнцем. Поскольку *Oph 98 A* и *B* столь легки и так существенно удалены друг от друга, система эта имеет самую низкую гравитационную энергию связи из всех известных. Слабая энергия связи означает, что эти небесные тела, скорее всего, сформировались в своей текущей конфигурации, а не возникли в разных местах и лишь затем стали парой, а это указывает на звездообразный механизм их формирования. А юный возраст системы (да, мы полагаем его равным 3 млн лет!) означает, что небесные тела планетной массы, очевидно, формируются не дольше, чем звезды.

Новые идеи

Наука о коричневых карликах сегодня достигла стадии, когда мы можем проводить более точные измерения и задавать более детальные вопросы, чем когда-либо прежде, касающиеся этих все еще загадочных объектов. Среди наиболее интересных открытий последнего времени — самые холодные коричневые карлики, получившие название «Y-карлики». Температура этих небесных тел составляет от 450° К до 250° К. Занимаясь Y-карликами, я люблю шутить, что изучаю самые крутые системы в Галактике! (*Здесь игра слов: англ. cool — это и «холодный», и «крутой» — Примеч. пер.*). Эти Y-карлики, хотя и не такие холодные, как Юпитер (125° К), позволили нам провести первое объективное сравнение коричневых карликов и атмосфер планет-гигантов нашей Солнечной системы. Y-карлики трудно наблюдать, поскольку они холодные и очень тусклые. Исходящее от них излучение лежит преимущественно в инфракрасном диапазоне с длиной волны 3–5 мкм, наблюдения в котором сильно затрудняет атмосфера Земли.

Невзирая на это, мы с коллегами опубликовали спектры нескольких Y-карликов и использовали теоретические модели, чтобы сделать вывод о наличии водно-ледяных облаков, а также

о значительном вертикальном перемешивании в атмосфере. В этом же диапазоне длин волн Юпитер испускает собственное излучение (а не просто отражает свет нашего Солнца), а также демонстрирует значительное вертикальное перемешивание. Мы надеемся, что, изучая Y-карлики, мы сможем отделить свойства Юпитера, обусловленные его планетной природой, — другими словами, тем, что он сформировался в околозвездном диске нашего Солнца и постоянно освещается солнечным светом, — от свойств, которые, возможно, присущи всем холодным газовым объектам, будь то планеты, экзопланеты или коричневые карлики. Пока наши исследования показывают, что в большинстве случаев интенсивная динамика атмосферы для них норма.

Эти идеи в отношении атмосферы коричневых карликов привели к появлению в науке новой области — экзометеорологии. Хотя коричневые карлики находятся слишком далеко, чтобы можно было визуально изучать особенности их атмосферы, мы можем увидеть ее отпечаток по изменению яркости. Когда облако или какой-либо другой объект вращается — появляется и исчезает из поля зрения, — характер излучения, исходящего от коричневого карлика, изменяется. Астрономы проанализировали модификации яркости коричневых карликов за много оборотов и нарисовали карты их пятен и полос, которые удивительно похожи на хорошо знакомые нам полосы и вихри на планетах-гигантах Солнечной системы. Было обнаружено, что яркость некоторых коричневых карликов за один оборот изменяется на 25%. Результаты этих исследований позволяют нам получить более общие представления об идущих там атмосферных процессах — мы обнаружили, что коричневые карлики с температурами, при которых распадаются облака, демонстрируют значительные колебания яркости, причем молодым объектам, как правило, присуща бóльшая изменчивость яркости.

Ученые выявили также и другие сходные черты у коричневых карликов и газовых гигантов. И у тех и у других, например, присутствуют сильные магнитные поля и происходят полярные сияния, как показали радионаблюдения характеристик движения заряженных частиц, вращающихся в их магнитных полях. Измеренные значения напряженности магнитного поля коричневых карликов в 1 тыс. раз сильнее, чем у Юпитера и в 10 тыс. раз сильнее, чем у Земли. Хотела бы представить, как выглядит ночное небо на одном из этих коричневых карликов: если учитывать красоту полярного сияния Земли, это, вероятно, было бы потрясающим зрелищем.

Недавно вопрос одного из студентов побудил участников другого проекта исследовать сравнительные характеристики атмосферы коричневых карликов и планет. Когда я читаю вводный курс астрономии, он включает рассказ о планетах Солнечной системы (и, конечно же, я добавляю гору информации о коричневых карликах). Одна любопытная деталь из того, что я рассказываю студентам: продолжительность дня на Юпитере зависит от того, как вы ее измеряете. Если вы хронометрируете движение видимых объектов в экваториальной области Юпитера, период вращения, который вы получите, будет на пять минут короче, чем период вращения, измеренный с помощью радиосигнала, исследующего динамику его внутренних областей. Один из студентов спросил меня, из-за чего возникает такая разница во вращении, и я ответила, что это потому, что на экваториальные области Юпитера воздействуют сильные зональные ветры. Ветры на Земле вызваны перераспределением солнечной энергии, но мы не знаем, в какой степени это применимо к ветрам Юпитера.

После лекции я продолжила размышлять об этом. Астрономы измерили радиоизлучение коричневых карликов, механизм которого тот же, что и у радиоизлучения Юпитера, а значит, мы можем измерить период вращения их внутренних областей. А наш метод отслеживания изменения яркости мы можем использовать для измерения периода вращения атмосферы. Так впервые у меня родилась идея измерить скорость ветра на коричневом карлике. Лучшим кандидатом, чтобы опробовать этот метод, из имевшихся в нашем распоряжении был метановый коричневый карлик с подтвержденным радиоизлучением. Чтобы определить скорость ветра, требовалось измерить оба периода с ошибкой не более 30 с. Мы с коллегами внесли предложение использовать космический телескоп «Спитцер» для измерения колебаний яркости коричневого карлика и подали заявку на использование комплекса радиотелескопов Очень большая антенная решетка им. Карла Янского в Нью-Мексико для более точного измерения периода колебаний радиоизлучения. Мне по-прежнему кажется маленьким чудом, что наши измерения показали разницу в периодах чуть более одной минуты, что соответствует скорости ветра 2,3 тыс. км/ч. В прошлом году мы опубликовали наши результаты в журнале *Science*. Такая большая скорость ветра на изолированном коричневом карлике означает, что атмосферные ветры не всегда обусловлены перераспределением солнечной энергии, оставляя открытым вопрос о том, вызваны ли ветры на Юпитере излучением Солнца.

Астрономы продолжают поиски коричневых карликов. Некоторые программы поиска сфокусированы на выявлении больших выборок коричневых карликов на покрывающих все небо изображениях с высоким разрешением, полученных в рамках таких программ, как 2MASS, WISE и Pan-STARRS (*Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System — Система телескопов панорамного обзора и быстрого реагирования, автоматическая система из двух телескопов, предназначенная для регистрации объектов до 24-й звездной величины. — Примеч. пер.*). Любители астрономии также вовлечены в поиски благодаря таким проектам, как *Backyard Worlds* («Миры по соседству»), который позволяет любому использовать данные, полученные в рамках программы WISE, в целях поиска признаков коричневых карликов и других движущихся объектов. Мы ожидаем, что предстоящая программа масштабных исследований с помощью Обсерватории им. Веры Рубин (наблюдения должны начаться в начале следующего года) и космического телескопа «Нэнси Грейс Роман» (запуск которого запланирован на 2025 г.) поможет расширить наш каталог коричневых карликов.

Печально, но мы не смогли добиться выделения средств для телескопа на Серро-Токо, он так и не построен. Но когда в этом году будет запущен космический телескоп «Джеймс Уэбб», астрономы получат беспрецедентную возможность взглянуть на коричневые карлики в инфракрасном диапазоне без помех со стороны земной атмосферы. Первый запланированный цикл наблюдений включает программы по изучению химического состава атмосферы Y-карликов и облаков пыльных коричневых карликов и даже по поиску планетных систем вокруг коричневых карликов. Вне всяких сомнений, тех, кто изучает одни из самых недооцененных небесных тел, ожидают захватывающие времена. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ The Discovery of Brown Dwarfs. Gibor Basri; April 2000.

Выходит 6 раз в год

Познавательный журнал для хороших людей

Анализ дыхания на газовые метаболиты – низкомолекулярные продукты обмена веществ – может стать основой ранней диагностики болезней

Кровососущие клещи служат переносчиками «родственников» возбудителей сыпного тифа – бактерий риккетсий, вызывающих клещевую лихорадку

Самые безопасные, но еще недоступные в России мРНК-вакцины против COVID-19 содержат матрицу для синтеза вирусного белка, «упакованную» в липидные пузырьки

Расселение по планете нежелательных растений-«мигрантов» – еще одна глобальная угроза биоразнообразию природных сообществ

При медленном беге «сгорает» больше жиров, чем при быстром – при максимальной физической нагрузке организм переходит на углеводное «топливо»

www.scfh.ru

НЕВРОЛОГИЯ

НОВОЕ ПОНИМАНИЕ БОЛЕЗНИ АЛЬЦГЕЙМЕРА

Иммунные клетки, которые называются микроглией, оказались перспективным объектом для исследователей, занимающихся поиском способов лечения этого нейродегенеративного заболевания

Джейсон Ульрих и Дэвид Холцман

В 1907 г. немецкий психиатр Алоис Альцгеймер опубликовал описание случая необычного заболевания, поражающего кору головного мозга. У 51-летней пациентки психиатрической клиники во Франкфурте-на-Майне появились симптомы, хорошо знакомые миллионам семей, где живут люди, страдающие от болезни Альцгеймера, как мы сейчас называем этот недуг: потеря памяти, спутанность сознания и дезориентация.

После смерти пациентки Альцгеймер обследовал ее мозг и сделал ряд важных наблюдений. Во-первых, размер органа был меньше среднего, то есть он атрофировался, потеряв нейроны. Во-вторых, внутри нейронов имелись клубки из белковых волокон, а снаружи — отложения в виде бляшек другого белка. В течение следующего столетия

эти два патологических белка — тау-белок и амилоид — оказались в центре внимания при исследовании причины болезни.

Однако, проведя вскрытие, Альцгеймер сделал еще одно наблюдение, про которое часто забывают. Он увидел под микроскопом структурные изменения и в некоторых клетках, не относящихся



ОБ АВТОРАХ

Джейсон Ульрих (Jason Ulrich) — адъюнкт-профессор неврологии в Университете Вашингтона в Сент-Луисе.



Дэвид Холцман (David M. Holtzman) — профессор и глава отделения неврологии, директор по научным исследованиям Центра неврологических заболеваний Норе при Университете Вашингтона в Сент-Луисе и заместитель директора Центра Найта по изучению болезни Альцгеймера. Кроме того, он соучредитель компании C2N Diagnostics, занимается консультированием других организаций и участвует в исследовательских работах по грантам от разных компаний.



к нейронам. Они называются глией и составляют примерно половину от всех клеток мозга. С тех пор глиальными клетками занимались лишь немногие ученые.

Сейчас открытие Альцгеймера об изменениях в глиальных клетках оказалось в центре внимания. Один тип таких клеток называется микроглией. Это главные иммунные клетки в мозге, способные по-разному влиять на развитие заболевания как на ранних, так и на поздних стадиях. От активности микроглии также зависят сложные отношения между тау-белком и амилоидом — теми патологическими белками, которые приводят к гибели нейронов и потере памяти.

За последнее десятилетие исследователи выявили новые молекулярные факторы риска, от которых зависит влияние этих иммунных клеток мозга на развитие болезни Альцгеймера. С помощью мощных методов секвенирования генов мы начинаем разбираться в специфике микроглии, а также роли иммунной системы и ее воспалительных реакций в процессах, связанных с болезнью Альцгеймера.

Несмотря на то что мы уже много знаем как о биохимии тау-белка и амилоида, так и о генетических или средовых факторах, повышающих риск болезни Альцгеймера для отдельных людей, у нас все еще нет способов остановить или замедлить развитие заболевания. Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA) США 7 июня одобрило новый препарат адуканумаб, который убирает амилоидные бляшки из мозга. Однако неясно, насколько это поможет восстановить утраченные когнитивные навыки пациентов. По-прежнему требуются и другие процедуры. Недавние открытия, касающиеся микроглии, позволяют создавать новые потенциальные лекарства от этой болезни. Сейчас разрабатываются несколько препаратов, и некоторые уже проходят клинические испытания.

Бляшки, клубки и гены

Болезнь Альцгеймера — основная причина деменции во всем мире. Вызываемые ею множественные нарушения за несколько десятилетий накапливаются и достигают предельного уровня. У болезни есть два отличительных молекулярных признака. Первый — это бляшки из одного вида амилоидов, а именно бета-амилоида. Эти пептиды (короткие белки) находятся в межклеточном пространстве. Второй — деформированные, неверно свернутые формы тау-белка, к которому во множестве присоединены фосфатные группы вследствие процесса гиперфосфорилирования. Интенсивное фосфорилирование приводит к увеличению токсичности и слипанию белка. Тау-белок образует внутри тел нервных клеток переплетенные комки, которые называют нейрофибрилярными клубками. Некоторые молекулы тау-белка можно обнаружить рядом с амилоидными бляшками в раздутых поврежденных аксонах — длинных отростках, отходящих от тела клетки. Такие образования называются «нейритические бляшки с тау-белком».

И тау-белок, и белок — предшественник амилоида выполняют в здоровой клетке свои нормальные функции, которые нарушаются у пациентов при развитии болезни Альцгеймера. Благодаря интенсивным исследованиям патологических форм амилоида и тау-белка ученые пришли к выводу, что в болезни Альцгеймера следует выделить две стадии. Первая, предсимптоматическая, стадия длится 15–25 лет, в течение которых амилоид накапливается в самом верхнем слое мозга — коре, не вызывая когнитивных нарушений. На второй стадии в коре образуются тау-клубки, начинается процесс нейродегенерации и по мере гибели нейронов проявляются когнитивные нарушения.

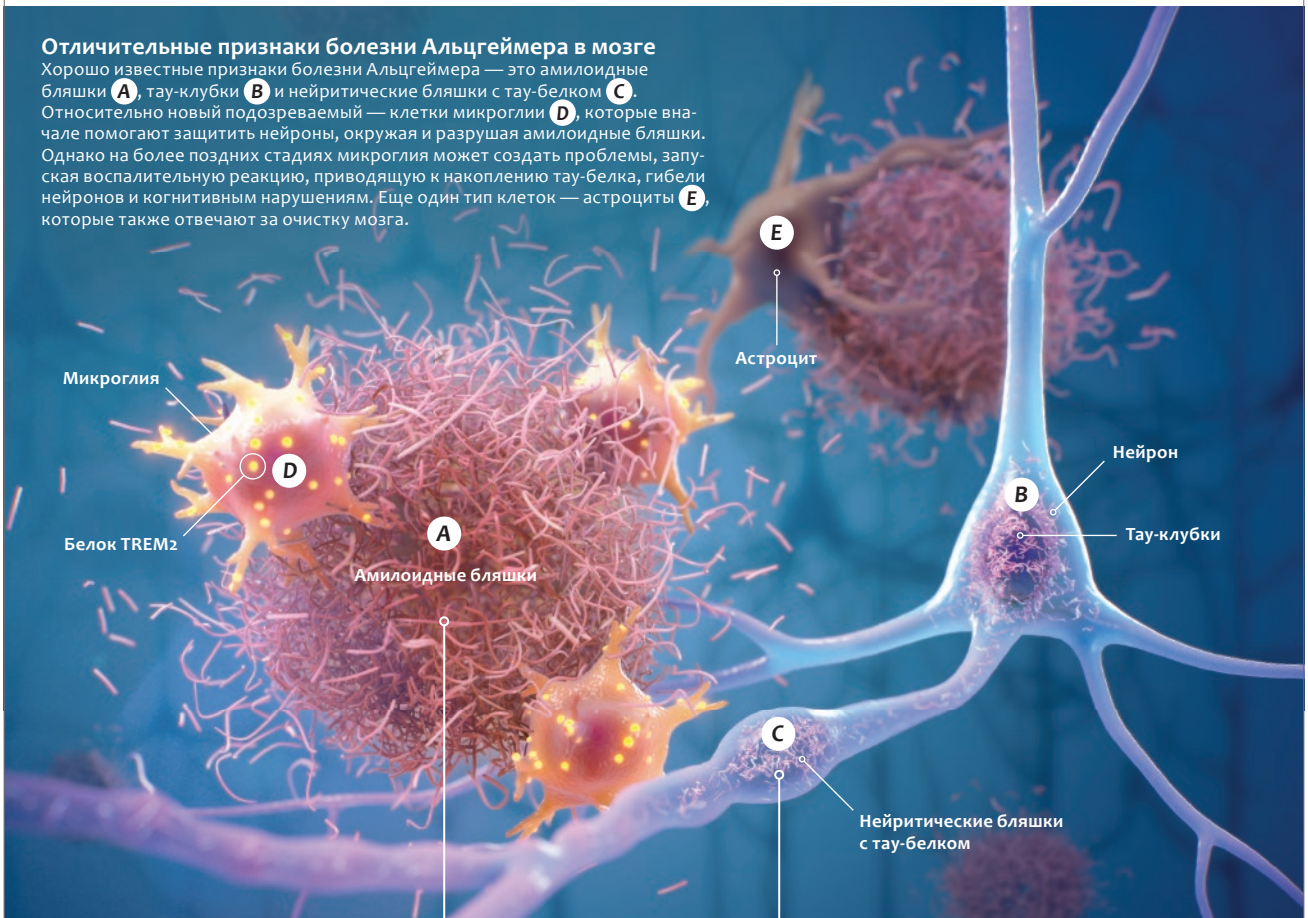
Исследователи, изучающие болезнь Альцгеймера, уже несколько десятилетий знают, что существуют генетические факторы, повышающие риск развития заболевания у отдельных людей, и эти гены

Поиск генетических механизмов

Многие исследователи болезни Альцгеймера, разочаровавшись из-за неудачных поисков новых методов лечения, обратили свое внимание на такие гены, как *TREM2*, кодирующий защитный белок, и *APOE4*, самый главный генетический фактор риска для этого заболевания. Понимание работы данных генов подсказывает новые идеи о том, как помочь более чем 6 млн человек в США, живущим с этим трагическим диагнозом.

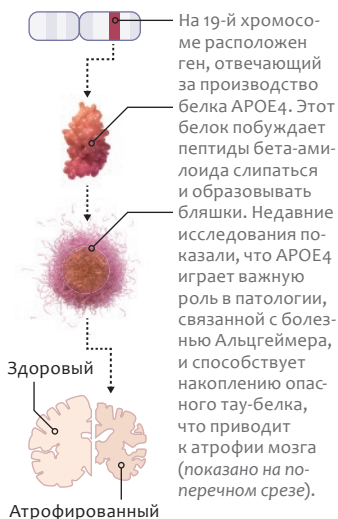
Отличительные признаки болезни Альцгеймера в мозге

Хорошо известные признаки болезни Альцгеймера — это амилоидные бляшки **A**, тау-клубки **B** и нейритические бляшки с тау-белком **C**. Относительно новый подозреваемый — клетки микроглии **D**, которые вначале помогают защитить нейроны, окружая и разрушая амилоидные бляшки. Однако на более поздних стадиях микроглия может создать проблемы, запуская воспалительную реакцию, приводящую к накоплению тау-белка, гибели нейронов и когнитивным нарушениям. Еще один тип клеток — астроциты **E**, которые также отвечают за очистку мозга.



Старый знакомый: APOE4

APOE4 — аллель гена, отвечающего за метаболизм липидов. Он кодирует белок, который выделяют клетки микроглии и астроциты. *APOE4* — главный генетический фактор риска для болезни Альцгеймера, развивающейся в позднем возрасте. Хотя впервые он описан в 1993 г., до сих пор его роль в развитии патологии при болезни Альцгеймера остается не до конца понятной. Новые исследования постепенно проясняют ситуацию.



Новый подозреваемый: TREM2

TREM2 — генетический фактор риска для болезни Альцгеймера, который работает в клетках микроглии, где кодирует мембранный рецептор. У данного белка парадоксальное действие, зависящее от стадии развития заболевания. В начале болезни активация этого сигнального пути помогает снизить повреждения от амилоида и распространение тау-белка. Однако на более поздних стадиях его активация может привести к повреждению нейронов и в конечном счете к их гибели.



дают полезную информацию о механизмах его развития. В первую очередь, с риском развития болезни Альцгеймера связан ген *APOE*. Он кодирует белок аполипопротеин Е (*APOE*), который участвует в метаболизме жиров и холестерина. В 1993 г. впервые выяснилось, что развитие болезни Альцгеймера может быть связано с одним вариантом (аллелью) этого гена, который значительно увеличивает риск заболевания. У человечества распространены три аллели гена *APOE*: *APOE2*, *APOE3* и *APOE4*. Чаще всего встречается *APOE3*, в популяции его доля составляет примерно 78%, затем идут *APOE4* (примерно 14%) и *APOE2* (примерно 8%). У каждого человека есть две аллели *APOE*, и примерно у 25% людей имеется хотя бы одна аллель *APOE4*. Однако среди пациентов с болезнью Альцгеймера носители хотя бы одной копии *APOE4* составляют 60%.

У людей с одной копией аллели *APOE4* риск развития болезни Альцгеймера вырастает в два-три раза, а если этот вариант представлен двумя копиями, то в 12 раз по сравнению с теми, у кого обе копии представлены аллелью *APOE3*. У носителей *APOE4* амилоидные бляшки начинают образовываться раньше и более интенсивно, потому что данный вариант аполипопротеина Е ухудшает удаление из мозга бета-амилоида и способствует слипанию белка. И наоборот: аллель *APOE2* снижает риск развития болезни Альцгеймера и вероятность образования амилоидных патологий.

Несмотря на то что *APOE4* оказывает сильное влияние, им не объясняется вся генетическая предрасположенность к болезни Альцгеймера. Генетики не покладая рук искали другие факторы риска, которые могли бы объяснить «потерянную наследуемость». Они использовали достижения в технологии генетического секвенирования, чтобы проверить тысячи людей и выяснить, какие изменения в ДНК связаны с большим или меньшим риском развития болезни Альцгеймера.

Такой крупномасштабный скрининг выявил те участки и гены, которые, по-видимому, влияют на риск развития болезни. Среди прочих это гены *CD33*, *BINI*, *CR1* и *MS4A6A*, кодирующие белки с разными функциями. Например, гены *CD33* и *CR1* несут информацию для синтеза расположенных на поверхности клетки рецепторов, которые воспринимают сигналы от других клеток. Данные гены, обнаруженные благодаря скринингу среди населения, немного влияют на риск развития заболевания.

Исследователи также секвенировали геномы тысяч пациентов с болезнью Альцгеймера, чтобы найти редкие аллели, способные оказывать сильное влияние на риск заболевания. Некоторые из этих генов работают преимущественно в микроглии — главных иммунных клетках мозга. В 2013 г. два исследования показали, что редкий генетический вариант *TREM2*, кодирующий

мембранный клеточный рецептор в микроглии, сильно увеличивает риск болезни Альцгеймера.

Благодаря данным, полученным в результате секвенирования, был обнаружен вариант, в котором произошла замена аминокислоты гистидина на аргинин. Показано, что эта мутация ухудшает функционирование микроглии и повышает риск развития болезни Альцгеймера приблизительно в два-четыре раза. Интересно, что *TREM2*, как и несколько других недавно открытых генетических факторов риска, в мозге работает исключительно в микроглиальных клетках. Это позволяет предположить, что микроглия может активно участвовать в развитии болезни. Но как именно?

Патрульная служба

Микроглия находится в родстве с макрофагами иммунной системы, патрулирующими организм, чтобы бороться с патогенами или помогать расчищать поврежденные ткани. Исследователи выяснили, что эти клетки участвуют в очень многих процессах начиная от борьбы с инфекцией и заканчивая обрезкой в развивающемся мозге лишних синапсов — мест соединения нейронов между собой. В нормальных условиях у клеток микроглии небольшие тела с похожими на ветви выростами, распространяющимися по всей ткани мозга. Эти защитные клетки поглощают, или, говоря более формально, фагоцитируют ненужные синапсы и отходы, а также ищут признаки повреждения или проникновения патогенов.

Если повреждение случается, то микроглия меняет форму и начинает действовать по-другому. Тела клеток увеличиваются, а отходящие от них отростки укорачиваются и уменьшаются в числе. Клетки микроглии мигрируют к месту повреждения и запускают там воспалительную реакцию. На протяжении десятилетий исследователи наблюдали, как микроглия окружает амилоидные бляшки, однако было непонятно, помогает ли она остановить накопление амилоида или же вызывает вредоносное воспаление. Связь между микроглией и тау-белком также не до конца ясна.

В некоторых работах было показано, что микроглия может повреждать аксоны и синапсы, создавая помехи передаче сигналов, в результате чего в клетках накапливался тау-белок.

Другие исследователи выявили, что воспалительные белки цитокины, которые выделяет микроглия, значительно усиливают опасный процесс гиперфосфорилирования. Открытие таких генетических факторов риска, как *TREM2* и *CD33*, указывает на конкретные вещества в микроглии, могущие участвовать в развитии болезни Альцгеймера. Исследователи надеются, что понимание функций этих белков позволит глубже разобраться в том, какую роль играет микроглия в патологическом процессе.

Ценный способ изучения влияния генетических факторов на изменения в мозге при болезни Альцгеймера — эксперименты на мышах. Сегодня существуют животные, у которых воспроизведены все аспекты этого заболевания (например, есть грызуны, в чьем мозге образуются амилоидные бляшки с последующим распространением патологического тау-белка и сопутствующей нейродегенерацией). Однако исследователи создали несколько десятков линий генетически модифицированных мышей, у которых присутствуют либо только амилоидные бляшки, либо только клубки тау-белка.

Скрещивая таких трансгенных животных с мышами, сконструированными для изучения генетических факторов риска болезни Альцгеймера, исследователи могут определить, с какими именно характерными для заболевания патологиями связаны те или иные аллели. Например, около двух десятилетий назад было показано, что у мышей со встроенным человеческим геном *APOE4* развивается больше амилоидных бляшек, чем у мышей, которым встроили аллели *APOE3* или *APOE2*. Недавно исследователи определили роль человеческого белка *TREM2* в болезни Альцгеймера, удалив ген *TREM2* у мышей из линии, моделирующей амилоидную патологию. В нескольких лабораториях у таких грызунов неизменно наблюдалось значительное уменьшение количества клеток микроглии вокруг бляшек.

В серии исследований, проведенных в лаборатории Марко Колонны (Marco Colonna) в Университете Вашингтона в Сент-Луисе, было показано, что у мышей, лишенных гена *TREM2*, микроглия не способна правильно ускорить свой метаболизм. В находящейся рядом с амилоидными бляшками микроглии не образовывалось достаточное количество аденозинтрифосфата (АТФ) — вещества, которое обеспечивает энергией клеточную активность. Из-за нехватки энергии клетки микроглии не могли окружить амилоидную бляшку. Затем ученые заметили увеличение числа вздутых, поврежденных от амилоида аксонов, так называемых дистрофических нейритов.

Такие ключевые изменения — уменьшение числа окружающих бляшки клеток микроглии и увеличение повреждения аксонов — были отмечены и при посмертном анализе срезов мозга пациентов с болезнью Альцгеймера, у которых в гене *TREM2* была редкая мутация R47H, описанная в 2013 г. Это позволило убедиться, что сделанные на мышах наблюдения отражают то, как работает ген *TREM2* у людей. Кроме того, группа ученых под руководством Хайме Груцендлера (Jaime Grutzendler) из Йельского университета показала, что чем меньше микроглии окружило бляшку, тем сильнее будут повреждены аксоны.

В этой работе найдено еще одно доказательство предполагаемой роли микроглии в защите от вредоносного действия амилоида в небольшой области вокруг бляшки. Выяснилось, что микроглия взаимодействует с концами тонких амилоидных волокон, вероятно, останавливая их рост или же ограждая окружающие нейроны от пагубного действия амилоида.

Вредоносная затравка

Если микроглия не позволяет амилоидным бляшкам повреждать аксоны, может ли она также защитить от тау-белка? Если да, то такие опасные мутации в гене *TREM2*, как R47H, должны усугублять патологические проявления болезни Альцгеймера, способствуя образованию нейритических бляшек с тау-белком. Проверка данной гипотезы пока проблематична, но некоторое подтверждение этому можно получить из исследований, где показано, что патологичная форма тау-белка может распространяться так же, как аномальные белки при прионных заболеваниях, таких как болезнь Крейтцфельда — Якоба, одна из форм которой вызывает коровье бешенство.

В течение последних десяти лет исследователи обнаружили, что и тау-белок, и амилоид принимают аномальную форму так же, как это делают прионы, под действием «затравки», которая превращает нормально свернутый белок в патологичный. Таким образом по мере развития болезни Альцгеймера патологическая форма тау-белка распространяется по связанным областям мозга. В серии исследований, выполненных в лаборатории Вирджинии Мань-Е Ли (Virginia Man-Yee Lee) в Пенсильванском университете, было показано, что введение в мозг здоровой мыши затравки в виде слипшихся тау-белков, взятых из мозга пациента с болезнью Альцгеймера, приводит к неправильному сворачиванию тау-белков и образованию нейрофибриллярных клубков. А если у животных уже имелись амилоидные бляшки, то у них образовывались нейритические бляшки с тау-белком, повреждающие аксоны. Это напоминало процесс развития болезни Альцгеймера. И хотя у этих мышей не наблюдалось значительной нейродегенерации, такой подход с введением затравки считается эффективным методом изучения патологий, связанных и с амилоидом, и с тау-белком.

В норме тау-белок не участвует в развитии патологий, а находится в аксоне, где стабилизирует белковую структуру микротрубочек, которые служат для транспорта веществ из одной части нейрона в другую. Коллектив под руководством Ли обнаружил, что в раздутых аксонах около амилоидных бляшек тау-белок отделяется от микротрубочек, что делает их потенциально более склонным к искривлению. По сути, эти деформированные аксоны превращались в плодородную почву, где среди

многочисленных амилоидных образований в коре могла укорениться затравка из патологического тау-белка.

Поскольку мутация R47H приводит к созданию такого белка TREM2 в микроглии, который увеличивает повреждение аксонов, мы решили, что обычная форма белка TREM2 поможет этому барьеру из защитных клеток, окружающих амилоидную бляшку, предотвратить образование клубков на основе затравки из тау-белка или остановить дальнейшее распространение затравки в соседние области коры мозга. В исследовании под руководством Шерил Лейнс (Cheryl Leys) и Мод Гратузе (Maud Gratuze), работавших тогда в нашей лаборатории, тау-затравку из мозга пациента с болезнью Альцгеймера вводили в мозг мышей, у которых либо были гены нормально функционирующего белка TREM2, либо их не было. Оказалось, что у мышей без этого белка образовывалось больше нейритических бляшек с тау-белком и раздутых аксонов. По цепочкам связанных между собой нейронов это повреждение распространялось и на другие области мозга.

Кроме того, мы использовали линии мышей, полученные в лаборатории Колонны, которые содержали либо нормальный ген *TREM2*, либо ген с мутацией R47H. И снова у грызунов с мутацией R47H при введении затравки рядом с амилоидными бляшками образовалось больше нейритических бляшек с тау-белком. Для подтверждения данных, полученных на мышах, мы изучили и человеческий мозг — и обнаружили, что у пациентов с вариантом гена *TREM2*, связанным с болезнью Альцгеймера, было больше нейритических бляшек с тау-белком. Из этого мы сделали вывод, что нормальный белок TREM2 и, возможно, микроглия в целом предотвращают накопление амилоида и распространение патологического тау-белка по мозгу.

По-видимому, на начальной стадии болезни Альцгеймера при высоком содержании амилоидных бляшек в коре микроглия предотвращает патологии, связанные с тау-белком. Но защищает ли она и на симптоматической стадии, когда образуются нейрофибрилярные клубки и идет нейродегенерация? В двух важнейших исследованиях, одно из которых было выполнено лабораторией под руководством Идо Амита (Ido Amit) в Институте им. Вейцмана в Реховоте в Израиле, а другое Олегом Бутовским из Женской больницы Бригама, ученые оценили изменения в активности генов микроглии на мышах, моделирующих разные нейродегенеративные заболевания. Оказалось, что наборы активных генов были удивительно схожи между собой.

Исследователи обнаружили, что в микроглии мозга мышей с нейродегенеративными повреждениями, схожими с теми, которые возникают при

патологии тау-белка, активируются различные гены, многие из которых кодируют белки, отвечающие за утилизацию ненужных веществ в клетке. В этот период в микроглии сильно увеличилась активность мышшиной версии генетического фактора риска *APOE4*. Видимо, оба гена, *APOE* и *TREM2*, играют важную роль в активации микроглиального ответа, когда нейроны начинают гибнуть и появляются первые симптомы.

Данное открытие подтолкнуло нас скрестить мышей, у которых работают разные варианты человеческого белка *APOE*, с модельными мышами, у которых развиваются и патологии тау-белка, и выраженная нейродегенерация. В исследовании, выполненном сотрудницей нашей лаборатории в Университете Вашингтона в Сент-Луисе Ян Ши (Yang Shi), было показано, что у животных из модельной линии с тау-патологией, у которых работал ген *APOE4*, процесс нейродегенерации был намного более интенсивным по сравнению с мышами, у которых работали гены *APOE3* или *APOE2*. Далее мы оценили интенсивность гибели клеток у людей с болезнью Альцгеймера и другими нейродегенеративными заболеваниями, связанными с накоплением тау-белка. Оказалось, что у носителей аллели *APOE4* повреждения в мозге были выражены сильнее, чем у носителей других аллелей.

Кроме того, здоровье пациентов с болезнью Альцгеймера, у которых была аллель *APOE4*, ухудшалось быстрее, чем у тех, у кого ее не было. Это стало для нас неожиданностью, потому что долгое время считалось, что основной эффект *APOE4* состоит в накоплении большого количества амилоида. Однако исследования указывают, что *APOE4* не только участвует в регуляции амилоидных патологий, но и определяет скорость гибели нейронов в ответ на развитие патологий тау-белка. Это значит, что «ген болезни Альцгеймера», как иногда называют *APOE4*, влияет не только на отложение амилоида, но и на повреждения нейронов вследствие накопления тау-белка, то есть на обе главные стадии заболевания.

Такое более полное представление о гене *APOE4* привело нас к следующему эксперименту на мышах. Мы показали, что удаление мышшиной версии гена *APOE* оказывает сильное защитное действие против нейродегенерации, замедляет развитие патологии тау-белка и, что более важно, замедляет повреждение мозга, вызванное накоплением тау-белка. Если удаление гена *APOE* оказало нейропротективное действие у мышей, возможно, снижение содержания белка *APOE* в человеческом мозге сможет замедлить нейродегенерацию, особенно у носителей аллели *APOE4*.

В другом эксперименте мы использовали линию мышей, моделирующую патологию, связанную с тау-белком. Кроме того, у этих животных работал ген *APOE4*. Мы решили проверить, будет ли

снижение уровня данного варианта апополипротеина защищать от нейродегенерации. Мы сотрудничали с компанией *Ionis Pharmaceuticals*, чтобы использовать антисмысловые олигонуклеотиды — короткие цепочки нуклеотидов, которые приводят к разрушению матричной РНК (молекулы, которая в клетке несет инструкцию о синтезе конкретного белка). Таким образом можно снизить содержание АРОЕ4 в мозге мыши в два раза. Мы обнаружили, что снижение уровня АРОЕ4 в период начала развития патологии, связанной с тау-белком, защищало нейроны и ослабляло воспалительную реакцию и активацию микроглии в мышинном мозге.

В целом похоже, что микроглия играет две различные роли в развитии болезни Альцгеймера. У линии мышей, моделирующей амилоидную патологию, усиление активности микроглии вокруг бляшек, по-видимому, защищало мозг. Однако у линии мышей с патологичным тау-белком наличие ненормальных скоплений тау-белка заметно усиливало активность генов микроглии, связанных с процессом нейродегенерации, а присутствие АРОЕ4 приводило к еще более сильной воспалительной реакции в мозге. Все это свидетельствует о том, что интенсивная защитная реакция микроглии на патологичный тау-белок усиливает повреждение, а не защищает мозг.

Конечно, корреляция — это не причинно-следственная связь; и на тот момент из наших исследований не было понятно, вызывает ли у мышей с патологией тау-белка, у которых работает ген АРОЕ4, сильный иммунный ответ нейродегенерацию или просто возникает как ответная реакция. Дальше мы решили проверить, усилит ли потеря рецептора TREM2 на поверхности клеток микроглии нейродегенерацию и воспаление в мозге. Было бы неудивительно, если бы микроглия помогала защитить нейроны и на этой более поздней стадии заболевания.

И снова мы провели эксперимент со снижением активности генов. Инактивация гена *TREM2* у мышей с патологией тау-белка ослабила ответную реакцию микроглии и уменьшила уровень нейродегенерации. Результаты позволяют предположить, что снижение активности клеток микроглии приводит к уменьшению повреждения и атрофии мозга от патологий тау-белка.

Обоюдоострый меч

В двух исследованиях 2019 г. были найдены дополнительные доказательства того, что активность микроглии может приводить к потере нейронов и впоследствии к ухудшению когнитивных процессов. Если ввести мышам препарат, блокирующий действие колониестимулирующего фактора 1, важнейшего белка, необходимого для выживания микроглии, то это приведет к потере около 90% микроглиальных клеток в мозге. У мышей

с патологией тау-белка, которые получили препарат, наблюдалось значительное снижение образования нейрофибриллярных клубков и нейродегенерации. Это означает, что для нейродегенерации, связанной с тау-белком, необходима микроглия. Такие результаты показывают, что активация сигнального пути, начинающегося от рецептора TREM2, приводит к неоднозначному эффекту: он может быть либо защитным, либо разрушительным — в зависимости от стадии развития заболевания.

По-видимому, активация сигнального пути, начинающегося от рецептора TREM2, на предсимптоматической стадии и, возможно, в начале симптоматической помогает снизить повреждения, которые амилоидные бляшки могут нанести соседним аксонам и синапсам. Микроглия также препятствует распространению тау-белка по коре головного мозга. Однако как только разовьется патология тау-белка, активность микроглии может приводить к потере синапсов и гибели нейронов.

Если повреждающее действие микроглии, выявленное у мышей с патологией тау-белка, имеет место и у людей с болезнью Альцгеймера (а это все еще очень большое допущение), то целесообразной тактикой лечения было бы направленное влияние на микроглию. На предсимптоматической и ранней симптоматической стадиях, возможно, было бы разумно стимулировать активность клеток микроглии, особенно в области амилоидных бляшек. А на более поздних стадиях болезни, наоборот, подавление микроглиальной реакции могло бы замедлить нейродегенерацию и темпы когнитивных ухудшений.

Возможно, по мере того как мы будем узнавать больше о поведении микроглии в ответ на патологии амилоида и тау-белка, появятся новые мишени для разработки лечения этого разрушительного заболевания. Сейчас в клинических исследованиях на людях проверяется, действительно ли активация рецептора TREM2 может замедлить течение болезни Альцгеймера на ранних стадиях, и начинается разработка множества других лекарственных препаратов, направленных на клетки микроглии. Если эти подходы будут эффективными, то окажется, что именно третье наблюдение, сделанное Алоисом Альцгеймером во время знаменитого вскрытия, обобщенное вниманием по сравнению с хорошо известными бляшками и клубками, поможет смягчить ужасное воздействие недуга на мозг пациентов. ■

Перевод: М.С. Багоцкая

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Косик К. Путь вперед // ВМН, № 7, 2020.

НЕЙРОБИОЛОГИЯ

ЗАИКАЮЩИ МОЗГ



Photographs by Anthony Francis

ЙСЯ

Раньше в этом расстройстве речи обвиняли самого человека или его родителей, но сейчас известно, что оно обусловлено особенностями генов и нервных связей. Благодаря новым открытиям появятся и новые направления для лечения

Лидия Дэнурт



Ли Ривз, заикающийся с детства, демонстрирует три звука, вызывающие у него трудности: *L* (слева), *W* (в центре) и *ST* (справа). Если ему удастся расслабиться в момент произнесения этих звуков, то он заикается слабее.

ОБ АВТОРЕ

Лидия Дэнурт (Lydia Denworth) — популяризатор науки, пишущий редактор *Scientific American*, автор книги «Дружба: эволюция, биология и необычайная сила фундаментальной связи жизни» (*Friendship: The Evolution, Biology, and Extraordinary Power of Life's Fundamental Bond*, 2020).



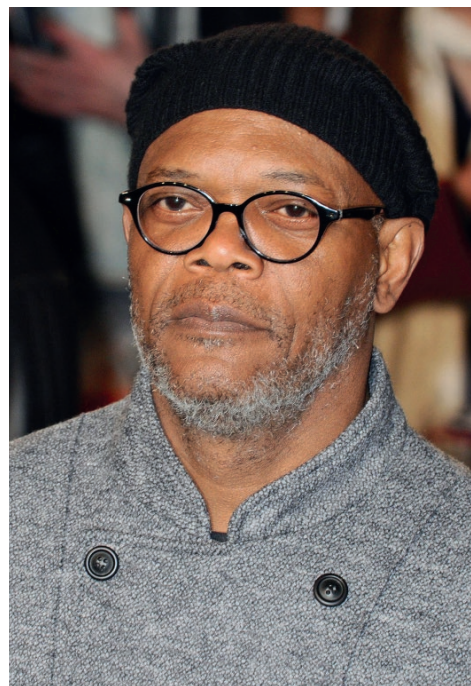
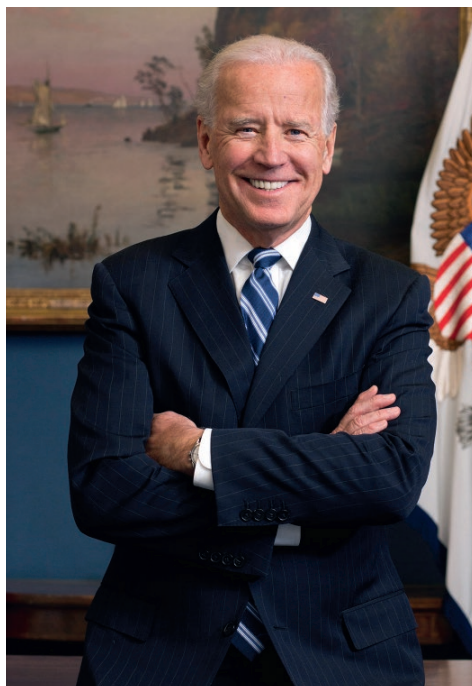
Л

и Ривз (Lee Reeves) всегда хотел быть ветеринаром. Когда он учился в старших классах школы в Вашингтоне, он пришел в ветеринарную клинику рядом со своим домом, чтобы устроиться на работу. Было субботнее утро, и врач был загружен работой. В регистратуре ему сказали, что с доктором сейчас нельзя поговорить, он слишком занят. Однако Ривз был настроен решительно и остался ждать. Через три с половиной часа, завершив осмотр всех собак и кошек, ветеринар вышел и спросил Ривза, что ему нужно.

Ривз, заикавшийся с трехлетнего возраста, отвечал с трудом. «Я как-то справился с тем, чтобы сказать, что хочу работать, и он спросил, как меня зовут, — рассказывает Ривз. — Я не смог бы назвать свое имя, даже если бы от этого зависела моя жизнь». В итоге ветеринар протянул лист бумаги и предложил Ривзу написать туда имя и номер телефона, но сказал, что работы нет.

«Я помню, как, выходя из клиники в то утро, думал что, в сущности, моя жизнь кончена. Я не только никогда не стану ветеринаром, мне даже клетка чистить не дадут».

С тех пор прошло более 50 лет. Ривз, которому сейчас 72 года, успешно занимается поддержкой людей с нарушениями речи, но воспоминания о разочаровании и смущении, которые он испытал в тот день,



живы до сих пор. Такие чувства характерны для страдающих от заикания. По сути, заикание — это нарушение ритмического течения речи, но из-за физических усилий и эмоциональных эффектов, которыми оно часто сопровождается, наблюдатели ошибочно объясняли это состояние дефектами голосового аппарата или языка, когнитивными проблемами, эмоциональной травмой или нервозностью, переучиванием леворуких детей на праворучность и, что особенно печально, плохим воспитанием. Психиатры-фрейдисты считали, что заикание — «орально-садистский конфликт», а бихевиористы утверждали, что если навесить на ребенка ярлык «заикающийся», то это усилит проблему. Родителям Ривза говорили, что на его заикание не следует обращать внимание, надо подождать — и все пройдет.

Подобные мифы и заблуждения были развенчаны. За последние 20 лет, и особенно в течение последних пяти-десяти лет все большее количество исследований указывают, что заикание имеет биологические причины, а именно — нарушение нервно-психического развития. В мире более 70 млн человек страдают от заикания, и у большинства оно началось в раннем возрасте, когда ребенок учился говорить. Исследуя мозг заикающихся людей, ученые обнаружили тонкие различия как в структуре, так и в функциях, влияющие на гладкость речи. У заикающихся людей по сравнению с теми,

кто не страдает этим недугом, очевидны отличия в нейронных связях, интеграции речевой и двигательной систем и в работе важнейших нейромедиаторов, в частности дофамина.

Существует также и генетическая составляющая: исследователи выявили четыре гена, резко увеличивающих вероятность появления таких проблем с речью. Подобно тому как мерцание лампочки иногда возникает не из-за плохой нити накала, а из-за неисправности проводки во всей комнате, такие отличия представляют собой то, что нейробиологи называют «проблемой системного уровня» в мозге.

Благодаря этим нейробиологическим открытиям уже появились новые способы лечения. Сейчас проходят клинические испытания препарата, снижающего гиперактивность дофамина, а также разрабатываются другие лекарства. В нескольких недавних исследованиях показан полезный эффект от стимуляции мозга. И, учитывая чрезвычайную нейропластичность в очень раннем возрасте, специалисты теперь не рекомендуют выжидательную стратегию. «Результаты исследований мозга подтверждают, что желательно заняться этим как можно раньше», — говорит специалист по патологии речи Дж. Скотт Ярусс (J. Scott Yaruss) из Университета штата Мичиган.

Некоторые аспекты заикания остаются загадкой. От данного заболевания страдает около 1% взрослых и примерно 5% детей,

Знаменитые люди, вынужденные бороться с заиканием (слева направо): король Англии Георг VI, президент США Джо Байден, актеры Сэмюэл Джексон, Мэрилин Монро, Джеймс Эрл Джонс и Эмили Блант

PA Images and Alamy Stock Photo; White House Photo and Alamy Stock Photo; Michael Melis Alamy Stock Photo; Shutterstock and Alamy Stock Photo; Everett Collection, Inc., and Alamy Stock Photo; Everett Collection, Inc., and Alamy Stock Photo (from left to right)



более чем у 80% которых потом восстанавливается гладкая речь (так что Ривз действительно вполне мог бы перерасти проблему). Ученые, родители, врачи и, главное, люди, которые сами заикаются, — все хотели бы знать, почему у одних заикание проходит, а у других нет. Лечение иногда помогает, но, по-видимому, это не дает ответа на вопрос. Долгосрочные исследования на детях могут пролить свет на загадку, и уже появляются результаты таких работ. Хотя было выявлено несколько связанных с заиканием генов, их роль в этом расстройстве пока в точности не ясна.

По мере того как все больше деталей головоломки встают на свои места, исследователи и врачи надеются, что признание биологических причин заикания поможет избавить общество от предубеждений на эту

Нейролептики, блокирующие в мозге рецепторы к дофамину, улучшали гладкость речи у некоторых заикающихся людей, но при приеме этих препаратов возникал риск серьезных побочных эффектов, таких как двигательные нарушения

тему. Хотя некоторые люди с заиканием и другими речевыми проблемами вершат великие дела, например президент Джо Байден, которому с трудом удавалось говорить, и поэтесса Аманда Горман, читавшая свои стихи на его инаугурации в начале года, но другие сталкиваются с большими сложностями. Многие заикающиеся имеют работу, не соответствующую их квалификации, и страдают от социальной тревоги и расстройств настроения. Психиатр и нейробиолог из Медицинской школы Калифорнийского университета в Риверсайде Джеральд Магуайр (Gerald Maguire) сам заикается. Он посвятил свою карьеру изучению этого состояния и разработке фармакологического лечения. Его брат, тоже

страдавший от заикания, покончил с собой. «Если мы поймем биологию явления, это откроет все возможные пути лечения и, надеюсь, стигматизация ослабнет», — говорит Магуайр.

От камешков к ПЭТ-сканированию

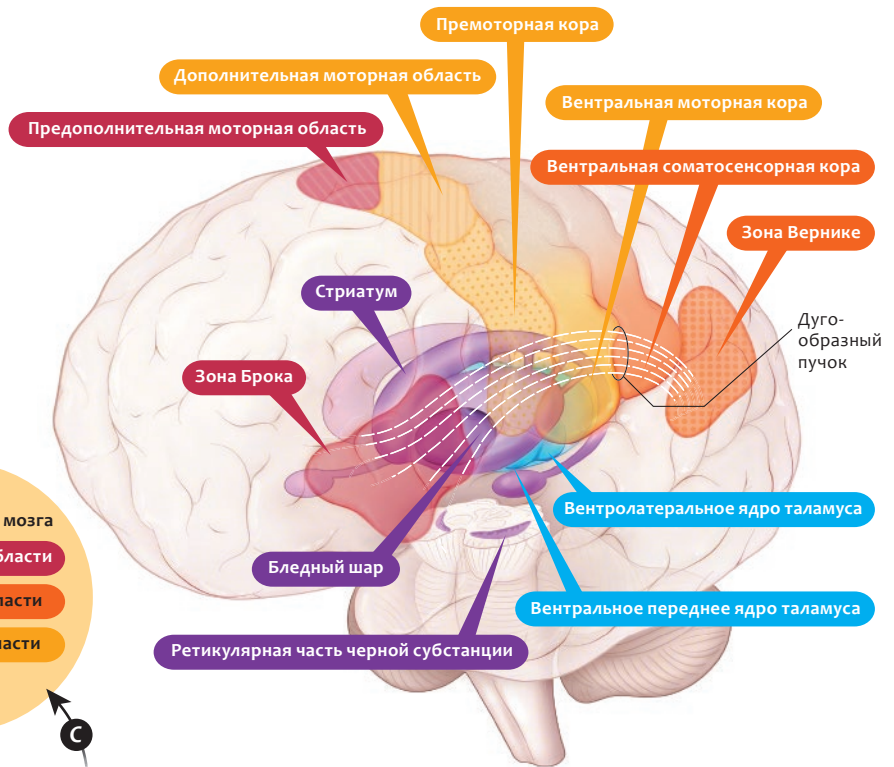
Заикание известно людям уже несколько тысяч лет, оно встречается во всех языках и культурах. Помимо Байдена, среди знаменитых людей, страдавших от заикания, были греческий оратор Демосфен, клавший в рот камешки для тренировки речи; король Англии Георг VI, чьи необычные логопедические занятия показаны в фильме «Король говорит!» (*The King's Speech*); актер Сэмюэл Джексон, использовавший ругательства, чтобы улучшить плавность речи. Заикание отличается от случайных или привычных спотыканий в словах. Повторение слов или пересыпание фраз междометиями «м-м-м» или «э-э-э» указывает на затруднения в планировании речи, в то время как у заикающихся людей речеобразование нарушено на базовом уровне. «Все это нарушения плавности, но не все заикание», — говорит Ярусс. Существуют три типа заикания: пролонгация, то есть растягивание звука (м-м-мужчина); повторение слогов или звуков (мо-мо-мо-можно); и блокировка, когда человек вообще не может издать ни звука. Если ребенок продолжает заикаться после восьми лет, он, скорее всего, будет заикаться всю жизнь.

Ривз описывает, что заикание ощущается как потеря контроля. «Вы знаете, что и как хотите сказать: слова, фразы, структуру предложения, интонацию, — но внезапно застреваете, — объясняет он. — Вы не можете продвинуться дальше, не можете вернуться назад. Все мышцы как будто заблокированы».

Впервые предположение, что заикание может иметь неврологические причины, возникло в 1928 г. Врач Сэмюэл Ортон (Samuel Orton) и специалист по патологии речи Ли Трэвис (Lee Travis) предположили, что заикание возникает в результате конкуренции между двумя полушариями мозга. «Они были на верном пути», — говорит Магуайр. Но выявить неврологические особенности заикающихся людей удалось только после появления сложных методов нейровизуализации в 1990-х гг. В 1995 г. Магуайр с коллегами опубликовали работу, в которой проблема впервые исследовалась с помощью позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ). Исследователи просканировали

Нейробиологические механизмы заикания

Речь — одна из наиболее сложных форм человеческого поведения, зависящая от миллисекундной координации разных частей мозга. Показано, что заикание связано с нарушениями в волокнах, передающих нервные импульсы из одной области в другую. В формировании речи задействованы три группы областей: в таламусе переключаются сенсорные сигналы, базальные ядра координируют движения, а кора головного мозга занимается мышлением и интеграцией сенсорных и моторных сигналов.



Существует множество связей внутри этих областей и между ними. В коре **A** важнейшую роль играет дугообразный пучок, у заикающихся людей в нем есть нарушения. Другие связи, по-видимому, происходят в базальных ядрах **B** и в сети, объединяющей все эти области, — кортико-базальноядерно-таламокортикальной петле **C**.

мозг четырех заикающихся людей и сообщили о постоянном снижении нервной активности в областях, связанных с речью. В другом раннем небольшом исследовании был обнаружен повышенный уровень дофамина в стриатуме, важнейшей части системы вознаграждения мозга.

Опираясь на это исследование, ученые протестировали нейролептики, блокирующие рецепторы к дофамину, и оказалось, что лекарства улучшали гладкость речи у некоторых людей, но при приеме данных препаратов возникал риск серьезных побочных эффектов, таких как двигательные расстройства, характерные для паркинсонизма. Однако оставалось много скептиков, которые были убеждены, что заикание не связано с работой мозга. Магуайр вспоминает, что, когда в конце 1990-х гг. он на научной конференции представил свою теорию о заикании как расстройстве на уровне мозга, его чуть ли не освистали.

В новейших исследованиях с использованием высокотехнологичных сканеров и продвинутых методов анализа подтверждается то, что было обнаружено в более ранних работах. У большинства людей речь обеспечивается преимущественно левым полушарием. У заикающихся взрослых по сравнению с не заикающимися наблюдалась меньшая активность в связанных с речью областях левого полушария и большая активность в правом полушарии. Например, когнитивный нейробиолог Кейт Уоткинс (Kate Watkins) из Оксфордского университета обнаружила, что вентральная премоторная кора — область в левом полушарии, расположенная рядом с речевыми зонами, — не активируется у заикающихся людей, когда они говорят.

Данный участок находится непосредственно над важным проводящим пучком белого вещества, связывающим слуховую зону с областями, отвечающими

Source: "Involvement of the Cortico-Subthalamic-Ganglionic-Thalamic Cortical Loop in Developmental Stuttering," by Song Eun Chang and Frank H. Giezinger, in *Frontiers in Psychology*, January 20, 2020 (loop reference), illustration by Booy Scientific

за контроль движений. В этом проводящем пути Уоткинс с соавторами обнаружили у людей с заиканием структурные отличия. Белое вещество образовано аксонами — длинными нервными отростками, передающими импульсы. «Это все кабели и провода, которые обеспечивают взаимодействия», — говорит Уоткинс.

Такие взаимодействия должны происходить точно в нужный момент. Для этого аксоны покрыты изоляционным слоем миелина, жироподобной субстанцией, которая ускоряет передачу сигнала. Хорошо миелинизированные волокна обычно идут параллельно друг другу, как волокна в черешках сельдерея. Но при сканировании мозга методом диффузионной МРТ видно, что у заикающихся людей аксоны чаще перекрещиваются.

«Среди двигательных актов, которые мы выполняем, самый сложный — это речь. Она зависит от миллисекундной координации между нервными путями и мышцами».

*Нейробиолог Су Ын Чан
(Мичиганский университет)*

Более того, жидкость и нейромедиаторы должны проходить по аксонам белого вещества так же, как вода двигалась бы по параллельным волокнам сельдерея. При сканировании мозга для оценки этого потока использовали показатель, который называется «фракционная анизотропия» (ФА): чем она выше, тем плотнее организовано белое вещество. У заикающихся людей стабильно наблюдались более низкие значения ФА в этом нервном тракте. По мнению Уоткинс, это означает, что те области мозга, куда поступает информация по белому веществу, иногда не получают сигнала и не активируются. (У заикающихся людей наблюдались аналогичные изменения и в других участках белого вещества, например в мозолистом теле, соединяющим полушария мозга между собой.)

Что касается работы мозга, то у людей, которые заикаются, по-видимому, недостаточно хорошо функционирует кортико-базальноядерно-таламокортикальная петля, обеспечивающая интеграцию слуховой, речевой и моторной информации. Как следует из названия, эта нервная цепь объединяет подкорковые структуры — базальные ядра (к которым относится стриатум) и таламус — с участками коры, расположенной на поверхности мозга. «Среди тех двигательных актов, которые мы выполняем, самый сложный — это речь, — говорит нейробиолог Су Ын Чан (Soo-Eun Chang) из Мичиганского университета. — Она зависит от миллисекундной координации между нервными путями и мышцами. Помимо прочего, петля обеспечивает плавный и своевременный запуск двигательной последовательности».

Пока точно не ясно, почему происходит сбой, но даже незначительные нарушения могут приводить к затруднениям с речью. «Все указывает на то, что базальные ядра действуют как коммутатор, — говорит Магуайр. — Если что-то на этом пути нарушено, может возникнуть заикание».

Возможно, сбой такого рода вызывают заикание. Однако они могут быть и компенсаторными изменениями, результатом попыток мозга приспособиться к проблемам, вызывающим заикание. Чтобы отличить причину от следствия, Чан работает с более 250 детей, наблюдение начинается с их трехлетнего возраста и длится на протяжении как минимум четырех лет. Некоторые из них избавляются от заикания, другие — нет.

В 2017 г. Чан с коллегами сообщили, что в начале у заикающихся детей наблюдалась недостаточная целостность белого вещества в пучке, соединяющем слуховую и моторную области левого полушария. Однако у детей, избавившихся от заикания, со временем целостность белого вещества улучшилась. «Этот показатель увеличился и нормализовался у выздоравливающих детей и остался прежним или даже ухудшился у тех, у кого заикание сохранилось», — поясняет нейробиолог.

У детей и взрослых, страдающих от заикания, она обнаружила нарушения в левой части мозга. У взрослых с правой стороны наблюдалась также гиперактивность: предположительно, это адаптивные изменения, возникающие в более позднем возрасте. По словам Чан, главный вопрос заключается в том, существуют ли в самом раннем

возрасте заметные различия между теми детьми, которые затем избавятся от заикания, и теми, у которых оно сохранится. «Было бы важно иметь признак, по которому можно достоверно судить, кто подвергается максимальному риску сохранения заикания», — отмечает исследовательница.

Все дело в семье

В значительной степени такой риск передается по наследству, через родительские гены. Изучение близнецов и приемных детей показывает, что гены объясняют 42–85% риска появления заикания. У однояйцевых близнецов значительно больше общих генов, чем у разнойяйцевых, и в одном исследовании если заикание было у одного близнеца, то оно наблюдалось у второго в 63% случаев, когда близнец однойяйцевой, и в 19% случаях, когда разнойяйцевой того же пола. Оставшаяся часть риска может быть связана с условиями среды (один из признаков существования такого негенетического влияния — то, что не всегда однойяйцевой близнец тоже заикается), причем некоторые факторы среды могут действовать в сочетании с генетической предрасположенностью. Однако что это за факторы — точно не известно.

Благодаря работе, которую генетик Дэннис Драйна (Dennis Drauna) из Национального института глухоты и других расстройств коммуникации начал около 20 лет назад, были идентифицированы некоторые связанные с заиканием гены. Драйна побывал в Пакистане, где приняты браки между двоюродными братьями и сестрами, из-за чего могут проявляться скрытые генетические проблемы. «Легко удалось найти большие семьи, в которых было очень много случаев заикания», — рассказывает ученый.

В 2010 г. Драйна с коллегами сообщили о трех найденных генах. С заиканием были связаны мутация в *GNPTAB* (ранее выяснилось, что этот ген участвует в развитии серьезного генетического заболевания, не имеющего отношения к заиканию), *GNPTG* и *NAGPA*. А затем Драйна получил вопрос через интернет от мужчины из Камеруна, который сообщил о большом количестве заикающихся в своей семье, — позже генетик встретил 71 человека из этой семьи, и 33 из них заикались. Это позволило выделить четвертый ген, *AP4E1*. (Информации о пятом гене пока опубликовано не было.) Драйна говорит, что вместе эти гены объясняют в лучшем случае 20–25% случаев заикания.

Все выявленные до сих пор гены связаны с внутриклеточным транспортом, то есть переносом молекул внутри клеток. В исследовании 2019 г. Драйна с коллегами выяснили, что у мышей, имеющих мутацию в гене *GNPTAB*, вокализация сопровождалась ненормально длинными паузами, так же как при заикании. У этих животных исследователи обнаружили сниженное количество астроцитов, клеток головного мозга, обычно в избобилии присутствующих в состоящих из белого вещества проводящих путях, соединяющих два полушария. Возможно, недостающее звено между генетикой и неврологией заикания — это лизосомы, занимающиеся удалением отходов из клеток, и мутации в соответствующих генах влияют именно на работу лизосом.

Покончить со стигматизацией

Наличие генетических причин у заикания не означает, что его нельзя лечить. Проводятся новые исследования, совершенствуются фармакологические подходы. Магуайр с коллегами считают, что на сегодня максимальные перспективы имеет использование препаратов, снижающих активность дофамина в определенных областях мозга. В частности, именно такой эффект имеют нейрорептики. Магуайр провел успешные испытания ризперидона, оланзапина и лurasидона, все они уменьшали тяжесть заикания. Но ни один из них не получил одобрения Управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (*FDA*) США. К сожалению, эти препараты могут давать нежелательные побочные эффекты, такие как набор веса и двигательные нарушения. Однако некоторые люди, и сам Магуайр в том числе, их принимают.

Сейчас Магуайр проводит крупномасштабное клиническое исследование препарата под названием «экопипам», который также тестируется для лечения синдрома Туретта. По сравнению с более ранними лекарствами экопипам взаимодействует с другим набором дофаминовых рецепторов. В небольшом предварительном исследовании препарат улучшал плавность речи и качество жизни и не имел явных побочных эффектов. Однако любое фармакологическое лечение заикания, которое будет одобрено *FDA*, вряд ли подойдет всем. «Я думаю, что будущее за персонализированной медициной, определением, что на самом деле происходит с каждым конкретным

человеком, — говорит Магауйр. — Сейчас выясняется, что заикание на самом деле не имеет единой причины».

Стимуляция мозга слабым электрическим током также кажется многообещающим подходом. В Оксфорде Уоткинс сочетает неинвазивную транскраниальную стимуляцию с использованием известных стратегий получения плавности речи, таких как чтение хором или произнесение речи с метрономом.

Уоткинс показала, что в группе, которая проходила такое комбинированное лечение, доля повторяющихся или растягиваемых слогов, или некоторых других признаков заикания снизилась с 12% до 8%. В контрольной группе, не получавшей стимуляцию, изменений не произошло. С учетом маленького объема выборки и небольшой продолжительности лечения (пять дней) даже этого достаточно, чтобы предположить, что Уоткинс что-то обнаружила.

Добавление стимуляции мозга к логопедическим занятиям может улучшать обучение. «При помощи стимуляции мы как бы укрепляем этот путь, заставляем его работать более эффективно», — говорит Уоткинс. На данный момент если заикающиеся люди захотят лечиться, то единственный доступный для большинства из них способ — традиционные логопедические занятия. Обычно они состоят из речевых тренировок и обучения заикающегося эффективному общению. Такие занятия могут давать хороший результат, но не всегда продолжительный, у большинства людей в какой-то момент возникает рецидив.

Однако в последние годы поменялись цели при лечении заикания. Вместо попыток искоренить проблему стараются облегчить ее принятие и научить контролировать. «Очень важно научиться преодолевать трудности», — говорит Ярусс. Он сравнивает это с катанием на коньках. Когда вы впервые надеваете коньки и выходите на лед, вы топчетесь на месте и чувствуете, что скользите и падаете. Но когда вы сможете не бояться ощущения скольжения, вы начнете действовать более умело.

Такое смещение акцентов можно только приветствовать. Кэтрин Морони (Catherine Moroney) 54 года, она физик и программист в Лаборатории реактивного движения NASA. По ее словам, в детстве она в принципе не могла добиться, чтобы ее поняли. Логопедические занятия значительно улучшили плавность ее речи, но лишь временно. Она завершила лечение как раз во время

изнурительной учебы в аспирантуре по физике. Тревога и стресс не вызывают заикание, но могут его усилить.

Сейчас у Морони умеренное заикание, раньше оно было сильнее. Ей повезло найти начальника, интересующегося только качеством ее работы, которая заключается в изучении облаков и их роли в климатической системе. Морони принимает нейролептик оланзапин, не одобренный для лечения заикания: «Это просто немного облегчает повседневную жизнь». Но в действительности жизнь Морони изменилась, когда она присоединилась к группе, которую она называет «моя заикающаяся семья». «Это может показаться нелогичным, но конференция заикающихся — самое шумное место в мире, — рассказывает Морони с улыбкой. — Никто никогда не замолкает. Возможность побыть несколько дней в большинстве дает ощущение свободы».

Ли Ривз, бывший председатель Национальной ассоциации заикания и один из первых сторонников движения самопомощи при заикании, с этим полностью согласен. Логопедические занятия улучшили плавность его речи, но их успешность абсолютно точно связана с тем, что его логопед был клиническим психологом, занимающимся психическим стрессом, связанным с заиканием. «Я научился заикаться на приемлемом для меня уровне», — говорит Ривз.

Заикание не помешало ему стать ветеринаром. Через три недели после его прихода в ветклинику ветврач Питер Малнати (Peter Malnati) позвонил Ривзу и предложил работу. Ривз проработал в клинике пять лет, пока учился в школе и колледже, в итоге он стал ветеринаром, специализирующимся на лечении мелких животных, и долгое время работал в Плейно, штат Техас. Дни разочарования и смущения для него давно прошли. «Я все еще заикаюсь. Я заикался вчера и заикаюсь сегодня, — говорит Ривз. — И надеюсь, что буду заикаться завтра, потому что это будет означать, что я все еще жив».

Перевод: М.С. Багоцкая

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Verbal Bottleneck. Katrin Neumann; Scientific American Mind, October 2006.



ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛ

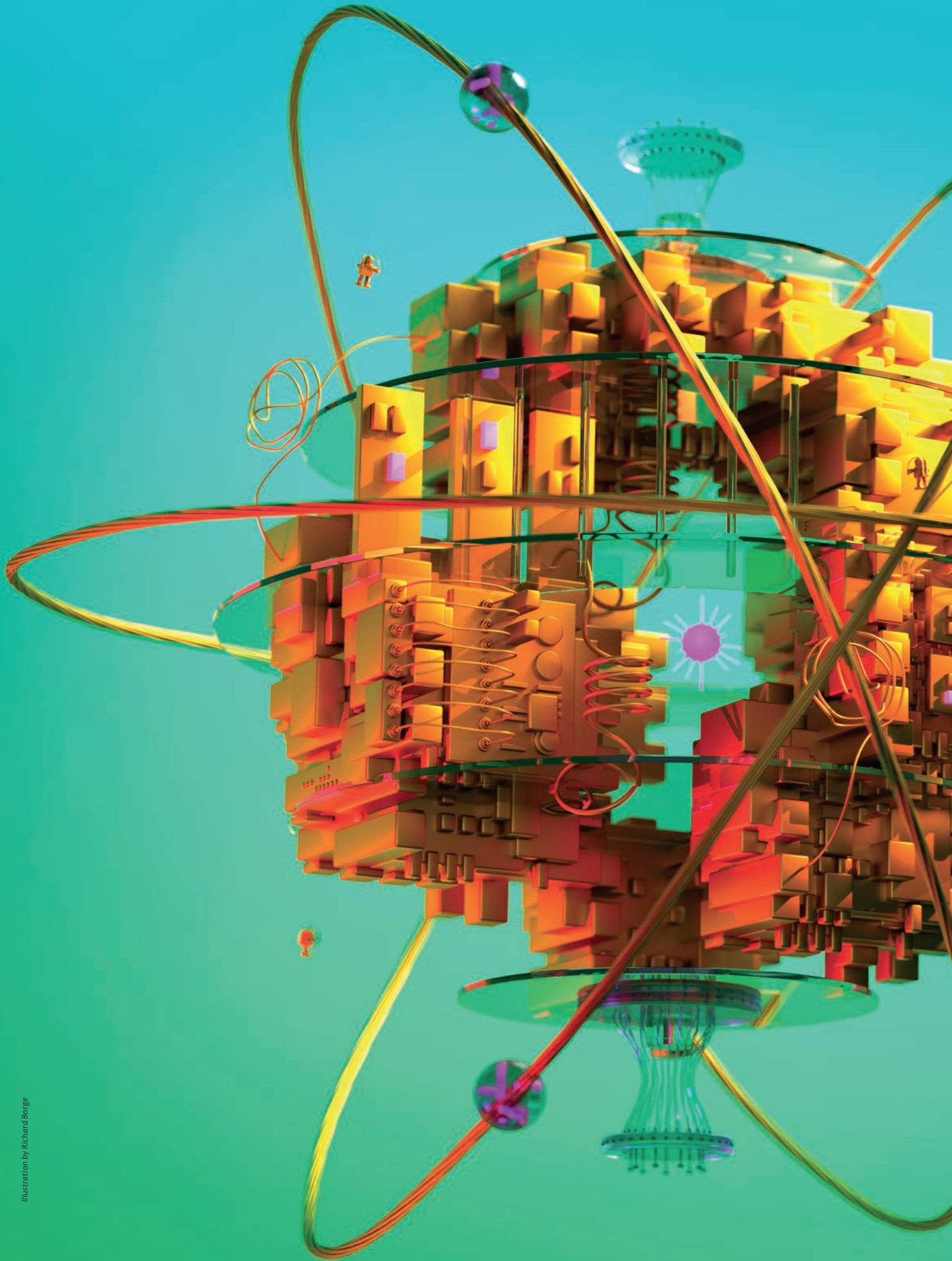
Научная Россия



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





КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Квантовое будущее ХИМИИ

Квантовые компьютеры выведут
молекулярное моделирование на новый
уровень точности, уменьшив зависимость
ученого от счастливого случая

Жаннетт Гарсия

ОБ АВТОРЕ

Жаннетт Гарсиа (Jeannette M. Garcia) — старший управляющий Группы квантовых технологических платформ, алгоритмов и теории компании *IBM Research*. Исследования ее команды сфокусированы на практическом использовании вычислительной математики и теории квантовых вычислений.



С

воей карьерой химика я в огромной степени обязана удаче. В 2012 г. я оказалась в нужном месте (в исследовательской лаборатории компании *IBM* в Альмадене, штат Калифорния) в нужное время — и совершила «ошибку». Чтобы получить известный продукт, мне следовало смешать в лабораторном стакане три компонента. Задачей было заменить один из обычных компонентов его версией, полученной из отходов пластика, чтобы повысить экологичность прочных пластиков, называемых термореактивными пластмассами.

Вместо этого, когда я смешала два компонента, в стакане образовалась белая твердая полимерная субстанция. Она была настолько прочной, что для того чтобы вытащить ее, пришлось разбить стакан. Более того, после пребывания в течение ночи в разбавленной кислоте она снова превратилась в исходные вещества. Совершенно случайно я открыла новое семейство перерабатываемых термореактивных полимеров. Сочти я это неудачным экспериментом и не продолжи дальнейшие исследования, мы бы так никогда и не узнали о том, что получили. Это было научное везение в его лучшем виде, в русле благородной традиции Роя Планкетта (Roy Plunkett), который, занимаясь химией охлаждающих газов, случайно изобрел тефлон.

Сегодня передо мной новая цель: уменьшить роль интуиции и счастливого случая в открытии новых химических веществ. Такие стоящие перед нами проблемы, как климатический кризис и *COVID-19*, настолько серьезны, что наш ответ не может зависеть от одной лишь удачи. Природа сложна и могущественна, и если мы хотим

добиться научного прогресса, то необходимо получить возможность точно моделировать ее. В частности, если нам следует достичь серьезного продвижения в области химии, нам необходимо научиться понимать энергетику химических реакций с высокой степенью достоверности. В этом нет ничего нового, просто подчеркивается главное ограничение: предсказание свойств даже простых молекул с абсолютной точностью выходит за пределы возможностей самых мощных компьютеров. Именно здесь в ближайшие годы квантовые вычисления открывают перспективу достижения значительных успехов.

Моделирование химических реакций на классических компьютерах требует аппроксимации, поскольку они не в состоянии точно рассчитать квантовое поведение более чем пары электронов: вычисления слишком объемны и занимают слишком много времени. Каждое приближение снижает ценность модели и увеличивает объем лабораторной работы, которую должны выполнить химики, чтобы проверить и направить модель. А вот квантовые вычисления

работают по-другому. Каждый квантовый бит, или кубит, может отображаться на спиновые орбитали конкретного электрона; квантовые компьютеры могут использовать квантовые явления, такие как квантовая перепутанность, для описания электрон-электронных взаимодействий без каких-либо аппроксимаций. Квантовые компьютеры сегодня достигли такого уровня, когда с их помощью можно начать моделирование энергетики и свойств небольших молекул, таких как гидрид лития, что открывает возможности построения моделей, которые обеспечат более короткий путь к открытиям, нежели те, что мы используем сейчас.

Моделирование химических реакций

Квантовая химия как отдельная дисциплина не нова. В начале XX в. немецкие химики, такие как Вальтер Хайтлер (Walter Heitler) и Фриц Лондон (Fritz London), показали, что ковалентную связь можно объяснить с помощью квантовой механики. В конце XX в. с ростом производительности доступных химикам вычислительных машин моделирование элементарных классических систем нашло практическое применение.

При этом, когда я работала над своей диссертацией в середине 2000-х гг. в Бостонском колледже, мало кто из химиков, проводивших опыты в лабораториях, обладал функциональными знаниями о том, что могут делать компьютеры в деле химического моделирования. Дисциплины (и необходимый набор навыков) были разными. Вместо того чтобы вникнуть в суть вычислительного подхода, проводившие опыты в лабораториях химики придерживались стратегии проб и ошибок, зачастую полагаясь при этом не только на свои знания и опыт, но и на удачу. Мне посчастливилось работать в исследовательской группе Амира Ховейды (Amir Noveyda), который давно осознал важность сочетания экспериментальных и теоретических исследований.

Сегодня теоретические исследования и моделирование химических реакций для понимания экспериментальных результатов стали обычным делом — в результате того, что теоретическая дисциплина становится все более изощренной и химики, проводящие эксперименты в лабораториях, постепенно начинают использовать эти модели в своей работе. Выходные данные моделей обеспечивают эффективную петлю обратной связи для новых открытий в лаборатории. Возьмем один пример: взрывной

рост химических данных, полученных с помощью экспериментов, проводимых одним из методов проб и ошибок, который получил название «высокопроизводительный скрининг», позволил создать хорошо разработанные химические модели. Промышленное использование этих моделей включает в себя разработку новых лекарств и материалов.

Ограничивающий фактор подобных моделей — необходимость упрощения. На каждом этапе моделирования необходимо выбрать ту или иную область, в которой можно пожертвовать точностью, чтобы не выйти за пределы вычислительных возможностей компьютера. На нашем языке это означа-

Квантовые компьютеры сегодня достигли такого уровня, когда с их помощью можно начать моделирование энергетики и свойств небольших молекул, таких как гидрид лития

ет работать с так называемыми крупнозернистыми моделями. Каждое такое упрощение снижает общую точность вашей модели и ограничивает ее возможности для поиска новых открытий. Чем грубее данные, тем более трудоемкой будет ваша работа в лаборатории.

Квантовый подход совершенно иной. В своем чистом виде квантовые вычисления позволили бы нам моделировать природу такой, какая она есть, без каких-либо приближений. Часто цитируется высказывание Ричарда Фейнмана «...природа не классическая, черт возьми, и если вы хотите ее моделировать, то лучше воспользоваться квантово-механической моделью». В последние годы мы наблюдаем стремительный рост мощности квантовых компьютеров. Компания *IBM* в 2020 г. дважды удвоила «квантовый объем» своего компьютера — показатель количества и качества кубитов в системе — и планирует к 2023 г. произвести чип с более чем 1 тыс. кубитов. Для сравнения: в 2016 г. их количество характеризовалось однозначными числами. Промышленные компании тоже уверенно заявляют о мощности и возможностях своих [квантовых] машин.

Закладка фундамента

Пока мы расширили сферу использования квантовых компьютеров для моделирования энергий, относящихся к основным и возбужденным состояниям молекул. Такого рода вычисления приведут нас к возможности исследовать множество различных путей реакций, а также молекулы, реагирующие на свет. Кроме того, мы использовали их для моделирования дипольного момента в небольших молекулах — и это шаг в направлении понимания того, как электроны распределены между атомами в химической связи, что также может рассказать нам кое-что о том, как эти молекулы будут вступать в реакции.

Заглядывая вперед, мы начали закладку основ для будущего моделирования химических систем с помощью квантовых компьютеров и исследовали различные типы вычислений для различных типов молекул, которые сегодня можно решить на квантовом компьютере. Например, что происходит, когда в системе присутствует неспаренный электрон? Это добавляет молекуле спин, что значительно усложняет вычисления. Как откорректировать алгоритм, чтобы он соответствовал ожидаемым результатам? Подобного рода работа позволит нам когда-нибудь взглянуть на свободные радикалы — молекулы с неспаренными электронами, которые, как известно, сложно анализировать в лаборатории или моделировать на классических компьютерах.

Разумеется, всю эту работу можно воспроизвести на классических компьютерах. Тем не менее все это было бы невозможно проделать с квантовой техникой, существовавшей еще пять лет назад. Прогресс последних лет позволяет надеяться, что в недалеком будущем квантовые вычисления могут стать мощным катализатором открытий в области химии.

Я не имею в виду будущее, в котором химики просто вводят в квантовое устройство алгоритм и получают готовый набор данных, позволяющих сразу же сделать открытие в лаборатории. То, что представляется возможным (а может быть, и уже возможно), — это включение квантовых моделей в качестве шага в существующие схемы, работа которых в настоящее время базируется на классических компьютерах. При таком подходе мы используем классические методы для требующей больших вычислительных ресурсов части модели. Это могло бы включать фермент, цепь полимера или металлическую поверхность. Затем

мы применяем квантовый метод для моделирования отдельных актов взаимодействия, таких как химия в активном центре фермента, непосредственное взаимодействие между молекулой растворителя и полимерной цепью или водородная связь в небольшой молекуле. Мы по-прежнему будем допускать приближения в некоторых частях модели, но добьемся гораздо большей точности в наиболее четко выраженных частях реакции.

Мы уже добились значительного прогресса в изучении возможности встраивания расчета квантово-электронной структуры в классически вычисляемую среду. Этот подход имеет множество практических приложений. Более быстрый прогресс в области полимерных цепей мог бы помочь нам решить проблему загрязнения пластиком, которая еще больше обострилась после того, как Китай сократил импорт перерабатываемых материалов. Энергетические затраты на переработку отходов в США остаются относительно высокими; если бы мы смогли разработать пластмассы, которые легче перерабатывать, можно было бы значительно сократить количество отходов. Если отвлечься от пластмасс, потребность в материалах с более низкими выбросами углекислого газа становится все более острой и возможность производить такие вещества, как реактивное топливо и бетон, уменьшив выбросы диоксида углерода, критически важна для сокращения его глобальной эмиссии.

Следующее поколение химиков, выпускников высшей школы, сегодня обладает большими возможностями по обработке данных, которые в 2000-х гг. нельзя было и представить. Но ограничения потенциала обработки данных имеют физический характер: классические компьютеры просто не в состоянии справиться с уровнем сложности структуры даже таких обычных веществ, как кофеин. В этом динамичном мире никакая скорость обработки данных не сможет заменить интуицию и счастливых случай; чтобы добиться больших успехов, вам понадобится удача. Однако если будущие химики возьмут на вооружение квантовые компьютеры, они, скорее всего, окажутся гораздо более везучими. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Лукин М., Монро К., Шелькопф Р. Квантовые связи // ВМН, № 7, 2016.

ГРАВИТАЦИЯ

ГЛАВНАЯ СИЛА

С АЛЕКСЕЕМ СЕМИХАТОВЫМ



ПРЕМЬЕРА В ОКТЯБРЕ

НА ТЕЛЕКАНАЛЕ «НАУКА»

12+

Реклама



ПОЗНАНИЕ



МОЯ ПЛАНЕТА
ТЕЛЕКАНАЛ



КАНАЛ
НАУКА



ЖИВАЯ ПЛАНЕТА
ТЕЛЕКАНАЛ



ИСТОРИЯ
ТЕЛЕКАНАЛ



ТЕЛЕКАНАЛ



ТЕЛЕКАНАЛ



ОКТАБРЬ 1971

Пионеры Юпитера. Два космических зонда весом 254 кг готовят к самому продолжительному из предпринятых когда-либо полетов: экспедиции к Юпитеру. На «Пионере F» и «Пионере G» будет по 11 научных приборов. Путешествие продлится 19–32 месяца, за это время они

пролетят 600–900 млн км. Каждый из космических аппаратов проведет около четырех дней в непосредственной близости от самой большой планеты Солнечной системы. Цифровые данные будут передаваться на Землю со скоростью 10^{24} бит/с и приниматься тремя параболическими антеннами диаметром 64 м: одна в Калифорнии, одна в Австралии и одна в Испании. Электроэнергия будет обеспечиваться плутониевыми термоэлектрическими генераторами мощностью 40 Вт в начале экспедиции.

Кабельное телевидение. В начале 1971 г. в США было 2,5 тыс. систем кабельного телевидения, обслуживающих 5,5 млн абонентов. Сначала это была простая схема подачи телевизионного сигнала хорошего качества в дом, в котором сигнал был плохой или не принимался вообще, получившая название «общественное телевидение с общей антенной», или CATV. Сегодня кабельное ТВ может предоставить абоненту гораздо больше каналов, чем имеется программ. Все системы, созданные за последние три года, имеют не менее 12 каналов. Разработана техника передачи до 80 черно-белых каналов, но все больше становилось цветных. Ограничение в самом приемнике: без дополнительного оборудования стандартные домашние телевизоры не могут принимать более 12 цветных каналов.



ОКТАБРЬ 1921

Используют ли мотыльки радиосвязь? Как бабочка привлекает самцов? Это не запах, потому что самцы летят по ветру туда, где находится самка. Другое предположение — самцов привлекает звук, но самку кистехвостки поместили в звуко-непропускаемую коробку и самцы по-прежнему ее находили. Недавно было высказано предположение, что мотыльки общаются с помощью электромагнитных волн очень короткой длины. Вероятно, самые чувствительные органы, которыми обладают бабочки, — это их усики. Усики самки (передатчик) отличаются от усиков самца (приемника). Этот очень похож на конструкцию радиоаппаратуры. Еще один любопытный момент — характер поведения самца, когда он приближается

к самке. Часто он садится неуверенно, двигая своими усиками-антеннами примерно так же, как оператор поворачивает рамку радиопеленгатора, чтобы обнаружить направление на передатчик, испускающий сигнал.

Примечание: в настоящее время исследования показывают, что самцы бабочки чувствуют запах выделяемых самками феромонов.

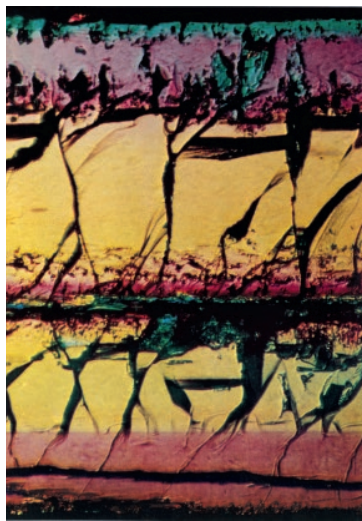


ОКТАБРЬ 1871

Табачные болезни. Есть много доводов за и против табака. Тот, кто пристрастился жевать, потребляет примерно 28 г в неделю. В год это около 8 кг сушеных листьев, смешанных с песком, стеблями, неочищенной патокой, оливковым маслом, грязью и мусором. Представитель Государственного стоматологического общества заявил,

что табак разрушительно воздействует на зубы как механически, так и химически. В официальных отчетах Больницы Гая и Больницы Св. Варфоломея указано, что во всех случаях рака ротовой полости пациент курил трубку. Можно проследить связь с табаком потери аппетита, дурных снов, головокружения, несварения, чахотки, бесплодия и болезней нервной системы.

Уходящая натура. Спустя 44 года после погребения останки итальянского патриота, поэта и ученого Уго Фосколо (Ugo Foscolo) были эксгумированы на кладбище в английском Чизике. Тело оказалось нетронутым, а черты безупречными. Бакенбарды все еще были на месте. Его кожа, теперь бледно-серого цвета, осталась не сморщенной, ткани также не повреждены. С целью написания исторического полотна синьор Кальдези сфотографировал тело в гробу, который был снова закрыт и официально опечатан.



Лунный камень (1971).

Размер кристалла пироксена (на фото увеличен), подобранного во время экспедиции «Аполлона-12» — около 2/3 мм сверху вниз. Желтая сердцевина — пижонит с низким содержанием кальция; розовая и пурпурная области — богатый кальцием авгит; зеленые зоны — богатый железом геденбергит.

Editor in Chief:

Copy Director:

Creative Director:

Managing Editor:

Chief Features Editor:

Chief News Editor:

Chief Opinion Editor:

Senior Editors:

Associate Editors:

Laura Helmuth
 Maria-Christina Keller
 Michael Mrak
 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

© 2021 by Scientific American, Inc.

В мире науки

SCIENTIFIC AMERICAN

Оформить подписку на журнал «В мире науки» можно:

в почтовых отделениях по каталогам:

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

по РФ и странам СНГ:

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

Читайте в следующем номере

Снять заклятие с Венеры

Три новые космические миссии возобновят исследования, главная цель которых — обнаружить, как и почему Венера стала «злым близнецом» Земли.

Охотники за метаном

Новая технология поможет четко выявлять выбросы метана, но готовы ли ее внедрять нефтегазовые компании и регулирующие государственные органы?

Пумы Лос-Анджелеса

Амбициозный проект призван помочь пумам, обитающим в горах Санта-Моники, найти путь к другим популяциям, чтобы избежать вырождения вследствие инбридинга.

СПЕЦИАЛЬНЫЙ РЕПОРТАЖ: АУТОИММУННЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ

Тело против самого себя

Миллионы людей страдают от того, что иммунная система, которая должна защищать человека, вместо этого нападает.

Предательство изнутри

Инвалидизирующие симптомы, невнятные анализы, неэффективные методы лечения: путешествие одного человека в мир аутоиммунитета.

Женщины в группе риска

Почему примерно четыре из пяти человек, страдающих аутоиммунными заболеваниями, — женского пола?





МИНОБРНАУКИ
РОССИИ



МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
М.В.ЛОМОНОСОВА



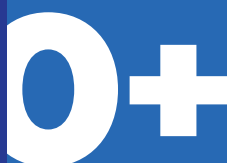
Правительство
Москвы



РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК

ВСЕРОССИЙСКИЙ ФЕСТИВАЛЬ НАУКИ НАУКА +

ОКТАБРЬ –
НОЯБРЬ
2021



ВХОД
СВОБОДНЫЙ



FESTIVAL
NAUKI.
RU

ГЕНЕРАЛЬНЫЕ
ПАРТНЕРЫ



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

СТРАТЕГИЧЕСКИЙ
ПАРТНЕР



ГЕНЕРАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПАРТНЕРЫ

