

В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Ежемесячный
научно-информационный
журнал

www.sci.ru.org

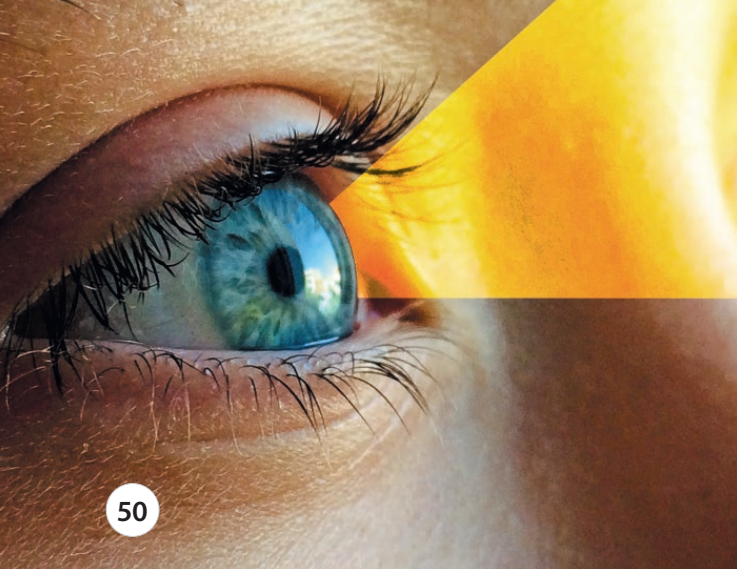
4 2021

12+

ВСЮДУ БЕСКОНЕЧНОСТЬ // ЗЕМНЫЕ ХРОНИКИ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ

**60-ЛЕТНЕ
ПЕРВОГО ПОЛЕТА
ЧЕЛОВЕКА В КОСМОС**





50



4

СОДЕРЖАНИЕ

Апрель 2021

Темы номера

КОСМОС

Земные хроники космических полетов 4

Наталья Лескова

Профессор **Леван Стажадзе**, пионер космической медицины, посвящает свои воспоминания об этих удивительных годах 60-летию первого пилотируемого полета в космос

НАУКА И ИСКУССТВО

Всюду бесконечность 12

Наталья Лескова

Художница с естественно-научным образованием **Любовь Мясникова** создает философские картины о космосе

ФИЗИКА

Космическая загадка 20

Клара Москович

Необычайно малая величина космологической постоянной — одна из самых больших нерешенных проблем физики

КОСМИЧЕСКИЕ ПОЛЕТЫ

Загрязнение космоса 28

Леонард Дэвид и Мартин Росс

Новое слово в освоении космоса — запуск частных космических аппаратов — позволит многое прояснить в области, касающейся обеспечения экологичности полетов



ЭНЕРГЕТИКА

Маленькое Солнце на Земле 34

Янина Хужина

Президент НИЦ «Курчатовский институт» **Михаил Ковальчук** — об управляемом термоядерном синтезе как главном способе преодоления энергетического кризиса



ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

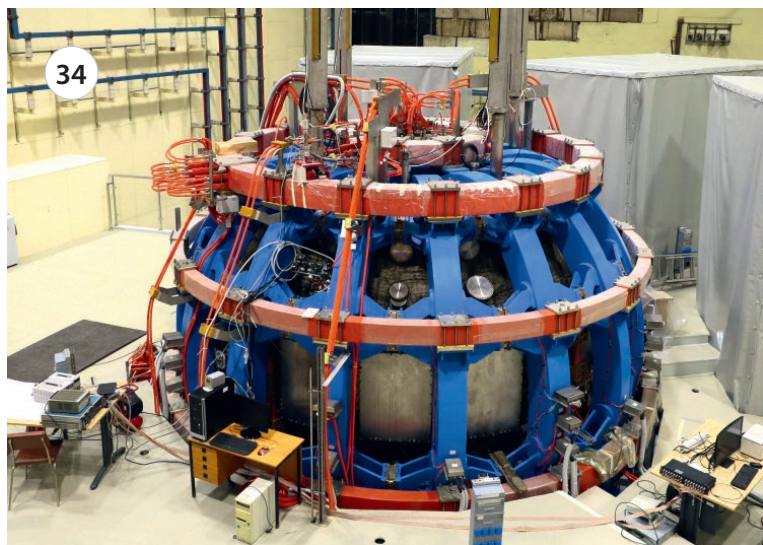
Большой завод по производству науки 42

Анастасия Пензина

Директор Института ядерной физики СО РАН **Павел Логачев** рассказывает о Сибирском кольцевом источнике фотонов — уникальной установке класса «мегасайенс»



72



34



28



12

МЕДИЦИНА

Хрусталик глаза — чудо природы 50

Константин Муранов и Михаил Островский
 Довольно давно стало понятно, почему хрусталик прозрачен, но до сих пор не вполне ясно, как не допустить его помутнения — развития катаракты

ЗДРАВООХРАНЕНИЕ

Как COVID-19 поражает органы чувств 58

Стефани Сазерленд
 Начинают появляться объяснения природы этого феномена на молекулярном уровне

ИММУНОЛОГИЯ

Иммунный хаос при COVID-19 62

Патрик Вонг и Акико Ивасаки
 Вирус процветает, подавив защитную систему организма

СПОРТ

На основании тестостерона 72

Грейс Хакис
 Уровень гормонов в организме становится орудием дискриминации спортсменов



ПОВЕДЕНИЕ ЖИВОТНЫХ

Нападение творца зомби 80

Кеннет Катанья
 Изумрудная оса — непреходящий кошмар американских тараканов

ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

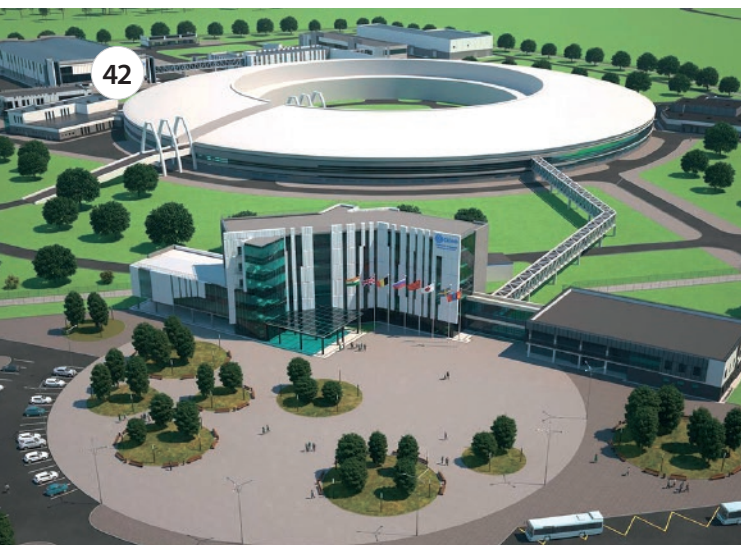
День, когда музыка умерла 90

Приянка Рунвал
 Болотный ясень, из которого производят самые знаменитые гитары в мире, исчезает из-за наводнений и жука-древоточца

Разделы

От редакции 3

50, 100, 150 лет тому назад 96



42



34

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 академик А.М. Сергеев

Ответственный секретарь:

О.Л. Беленицкая

Шеф-редактор иностранных материалов:

А.Ю. Мостинская

Выпускающий редактор иностранных материалов:

В.Д. Ардаматская

Зав. отделом российских материалов:

О.Л. Беленицкая

Выпускающий редактор:

М.А. Янушкевич

Обозреватели:

В.С. Губарев, В.Ю. Чумаков

Администратор редакции:

З.Х. Мусина

Научные консультанты:

член-корр. РАН М.В. Ковальчук; академик П.В. Логачев; д.б.н. К.О. Муранов;
академик М.А. Островский; к.м.н. Л.Л. Стажадзе

Над номером работали:

М.С. Багоцкая, А.П. Кузнецов, С.М. Левензон, Н.Л. Лескова, А.В. Лутченко,
Л.А. Мясникова, А.И. Пензина, А.И. Прокопенко, О.С. Сажина, Д.С. Хованский, 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.oaotprk.ru, www.oaompk.rf, тел.: 8 (495) 745-84-28, 8 (4963) 82-06-85

Заказ № 0474

© 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.

Фото на обложке: «Роскосмос»

У журнала «В мире науки» НОВЫЙ главный редактор

Им стал ректор МГУ им. М.В. Ломоносова академик В.А. Садовничий. Виктор Антонович был близким другом основателя русскоязычной версии журнала *Scientific American* — «В мире науки» — С.П. Капицы, его единомышленником и соратником. Много раз он участвовал в телепрограмме Сергея Петровича «Очевидное — невероятное», интервью В.А. Садовничего неоднократно выходили на страницах нашего журнала. С.П. Капица высоко ценил его не только как видного математика и незаурядного организатора науки и высшего образования, но и как человека с масштабными разносторонними научными интересами. По предложению В.А. Садовничего в 2011 г. в МГУ был создан Центр популяризации и распространения научных знаний, который возглавил С.П. Капица. В следующем году Сергей Петрович ушел из жизни, но дело его было продолжено.

14 февраля 2014 г., в день 86-летия С.П. Капицы, по решению руководства МГУ состоялось открытие памятной доски у дверей кабинета на первом этаже экономического факультета, в котором Сергей Петрович работал последние годы. Открывая церемонию, В.А. Садовничий сказал, что С.П. Капица был человеком, который создал целый пласт культуры, связанный с уважительным отношением к науке, и он считает своим долгом продолжить дело великого человека.



Вся наша команда уверена, что Сергей Петрович Капица был бы очень рад этому назначению. ■

Редакция журнала «В мире науки / Scientific American»

Виктор Антонович Садовничий — выдающийся ученый-математик, специалист в области информатики и прикладной математики. Действительный член Российской академии наук с 1997 г., входит в состав президиума РАН. Почти 30 лет возглавляет МГУ им. М.В. Ломоносова — крупнейший университет страны, признанный лидер высшей школы в России и за рубежом. Президент Союза ректоров России, объединяющего почти

700 университетов и высших учебных заведений страны. Член Постоянного комитета Конференции ректоров университетов Европы, ряда других международных научных и образовательных организаций. Член Римского клуба. Действительный член большого числа научно-общественных профессиональных академий, почетный доктор многих зарубежных и отечественных университетов.



Л.Л. Стажадзе измеряет пульс космонавту В.А. Соловьеву после длительного полета в специальной надувной палатке на месте посадки

ЗЕМНЫЕ ХРОНИКИ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ

Леван Лонгинозович Стажадзе — доктор медицинских наук, профессор, действительный член Международной академии астронавтики и настоящий первопроходец. Он стал одним из первых анестезиологов-реаниматологов в нашей стране, возглавив первое отделение реанимации НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского, одним из создателей абсолютно новой службы медицины катастроф, которая и поныне успешно действует в Москве. А в начале 1970-х гг. он организовал и долгие годы возглавлял новый отдел в Институте медико-биологических проблем АН СССР, который занимался медицинским сопровождением пилотируемых полетов. Сегодняшние воспоминания об этих удивительных годах посвящены 60-летию первого пилотируемого космического полета.



Доктор медицинских наук
Л.Л. Стажадзе

— Леван Лонгинозович, почему именно реаниматология стала вашей основной специальностью?

— Всю жизнь я работал вургентной медицине. С самого начала мне больше всего нравилась именно неотложная, скорая, экстренная медицинская помощь. Мой папа (Л.М. Стажадзе — создатель и директор легендарного московского ресторана «Арагви». — Примеч. ред.) был в хороших отношениях с выдающимся хирургом академиком А.А. Вишневским. Он бывал у нас дома, мы не раз встречались и в неофициальной обстановке. И когда я оканчивал медицинский институт, он сделал на меня запрос в свой институт. Все были уверены, что я распределюсь к А.А. Вишневскому и стану хирургом. Да я и сам хотел заняться кардиохирургией. Но жизнь, что называется, распорядилась иначе.

Распределение произошло 12 апреля 1961 г. Сейчас все знают, что это за дата. А тогда был обычный весенний день. Я захожу в комнату, где сидит комиссия, которая занимается распределением, и тут начинается что-то невообразимое. Люди вскакивают со своих мест, куда-то бегут, размахивают руками, кричат: «Человек в космосе!». Непередаваемые восторг и энтузиазм. Полет Юрия Гагарина нас всех окрылил и заразил. И мне вдруг стало ясно, что я тоже должен сделать что-то героическое.

— Что же вы сделали?

— Я принял решение пойти работать в обычную районную поликлинику участковым врачом. Надо понимать, что в начале 1960-х гг. в Москве шло бурное строительство, активное переселение людей из подвалов, полуподвалов в новые спальные районы. Врачей сразу стало остро не хватать,

особенно участковых. И я пошел работать, можно сказать, на передовую — в один из малоосвоенных районов Москвы, который тогда имел название Застава Ильича. Там еще были деревни. Начал там свою деятельность с нуля.

— Не пожалели, что не пошли в институт к А.А. Вишневскому?

— Нет, потому что работа участковым врачом — это огромная школа. Я и сейчас советую студентам не бояться, а два-три года проработать в поликлинике. Это школа самостоятельной работы, принятия решения на месте. Потом мне предложили подработку на неотложке. Я с удовольствием согласился. Причем я мог дежурить через сутки, не уставая. Мне очень нравились все эти сложности, я их не боялся.

— А потом вы попали в институт Н.В. Склифосовского?

— Работая в поликлинике, я ходил и в Институт экспериментальной и клинической хирургии к А.А. Вишневскому, и в институт Н.В. Склифосовского, там проводили очень хорошие городские научно-практические конференции по различным вопросам: травматологии, нейротравме, ожогам и т.д. Была собрана вся острая патология: инфаркты миокарда, гипертонические кризы, острый живот. Я научился хорошо понимать электрокардиограмму, что умеет далеко не каждый врач. Даже прошел специальные курсы. Нас консультировал А.М. Дамир, великий терапевт, который был допущен к самым первым лицам государства.

— А.М. Дамир — это отец Татьяны Дамир, которая была женой С.П. Капицы, основавшего наш журнал.

— Все верно, были две сестры, Елена и Татьяна. Татьяна оканчивала биофак МГУ, а Елена —

медицинский институт. Мы с ней были коллегами, она стала одним из первых анестезиологов — заведовала кафедрой анестезиологии на базе Боткинской больницы. Потом мы очень дружили, я не раз бывал у них на даче на Николиной горе. Эту дачу Алим Матвеевич подарил Сталин.

Дело было так. Сталин слег с какими-то непонятными болями в области сердца, и ему предписали 30 дней лежать неподвижно. Тогда был такой метод лечения инфаркта миокарда. Но Сталин сказал, что не может 30 дней лежать, делайте, мол, что хотите. И тогда к нему позвали Алима Матвеевича, который провел осмотр и говорит: «Вставайте, Иосиф Виссарионович». Тот отвечает: «Как вставайте? Мне сказали, что инфаркт, надо лежать». — «Да вставайте, не беспокойтесь». И его поднял. А он как раз в это время изучал так называемые кардиалгии — внесердечные боли, которые имитируют боли сердечные. И взял на себя такую огромную ответственность, потому что, если бы что-нибудь случилось, мы бы это имя забыли раз и навсегда. Но он не ошибся.

Так вот, Алим Матвеевич консультировал в нашей поликлинике. Вообще, это было принято — все великие хирурги и терапевты совершенно бесплатно раз в месяц консультировали больных в поликлиниках. Это была замечательная практика.

— Это Алим Матвеевич позвал вас работать в НИИ Склифосовского?

— Нет, не он лично, но его лекции, разговоры, общение с ним привели к тому, что мне вдруг стало ясно: мой институт — это Склиф. Меня за руку привел туда один знакомый, общий с Б.А. Петровым, нашим выдающимся хирургом, академиком, учеником С.С. Юдина. Он меня спрашивает: «Кем ты хочешь быть?» А в это время начала развиваться анестезиология. И я ответил, что хочу быть анестезиологом. И меня отправили в отделение анестезиологии, которым руководил первый официальный анестезиолог Советского Союза Б.Г. Жилис.

Поскольку анестезиологов в институте Склифосовского было очень мало, мы работали во всех отделениях: в гинекологии, куда привозили больных с внематочной беременностью, а это серьезные кровопотери, в травме, ожогах и т.д. Через несколько лет там начали создавать центр по лечению острых отравлений. Так мы осваивали всю патологию и могли спокойно дежурить сутками. Это сейчас анестезиологи разделились: один занимается только кардиологией, другой — нейротравмой, третий — ожогами. А тогда никакого разделения не было. И это сыграло решающую роль при выборе анестезиологов для усиления бригад неотложной хирургической помощи, которые работали на космос.

— Как получилось, что вы попали в космическую среду?

— В 1970-х гг. встал вопрос о длительных полетах, но станции пока еще не было. Один такой полет, самый длительный на тот момент, 17-суточный, в 1970 г. совершили космонавты А.Г. Николаев и В.И. Севастьянов. Обычный шарик — спускаемый аппарат с бытовым отсеком. Бытовой отсек маленький, шарик еще меньше. И получилось так, что они 17 суток пролетали без физических нагрузок, в состоянии гипокинезии в невесомости. К концу полета они очень хорошо адаптировались к невесомости, у них прекратились дискомфортные явления. А после завершения полета у них произошла резкая реадаптация к земной гравитации и оба были, чего греха таить, в коллаптоидном состоянии. Если в космосе идет прилив крови к голове, из-за чего наблюдаются чувство набухания, небольшие головные боли, рябь в глазах, то когда они спустились, кровь отхлынула от головы в нижние конечности и у них произошла анемия. Фактически это динамическое нарушение мозгового кровообращения.

Поднялся большой шум. Некоторые специалисты и космонавты начали говорить, что можно летать максимум две недели. Другая группа, которую возглавлял директор Института медико-биологических проблем АН СССР академик О.Г. Газенко, настаивала на том, что можно летать дольше, но нужна специальная профилактика — физическая нагрузка, разные тренажеры. Все это надо изучить, исследовать и принимать меры.

Поскольку планировались более длительные полеты, заместитель министра здравоохранения А.И. Бурназян, который занимался многими вопросами, в том числе по космосу, принял решение: в бригаде неотложной хирургической помощи нужны анестезиологи. В результате был издан приказ двух министров — министра обороны А.А. Гречко и министра здравоохранения Б.В. Петровского — о том, чтобы ввести в состав бригады неотложной хирургической помощи гражданских анестезиологов-реаниматологов. На стол А.И. Бурназяну легли 18 документов, в том числе и мои.

Аветик Игнатьевич посмотрел — там были очень хорошие ребята, сильные, я их всех знаю. Было несколько человек из Института хирургии им. А.В. Вишневского, Института экспериментальной и клинической хирургии им. Б.В. Петровского, Первого медицинского института, Боткинской больницы. Главным анестезиологом Минздрава тогда был А.А. Бунятян. А.И. Бурназян ему говорит: «Ребята все хорошие, но смотри — один сидит на легочной хирургии, другой — на сердечной, третий — на сосудистой. А вот Стажадзе из Склифа наркозы давал на травмах, ожогах, нейротравме, травме позвоночника, абдоминальных травмах, кровотечениях, отравлениях...» А.И. Бурназян тут же велел меня вызвать к себе. Никогда не забуду разговор с этим человеком. Это, конечно,

особая порода людей. Государственники. У него было несколько орденов Ленина. Это человек, который курировал атомную промышленность, потом ему поручили космос. Он мне говорит: «Мы тебя рекомендуем на секретную работу. Это очень ответственное дело. На две недели ты переезжаешь в Звездный, там тебя обучат всему необходимому. Будешь знать, как надо надевать и снимать скафандр, оказывать помощь, работать со спускаемым аппаратом».

Первый полет, на котором мне пришлось поработать, — полет на первую космическую станцию «Салют-1» в апреле 1971 г. В составе экипажа — В.А. Шаталов, А.С. Елисеев и Н.Н. Рукавишников. Стыковка не состоялась по техническим причинам, но я увидел, что такое спускаемый аппарат и что такое мягкая посадка. Елисеев и Шаталов уже в третий раз летали в космос, и у них адаптация была совершенно другая. А Рукавишников полетел в космос впервые, он еще только начал привыкать к невесомости, поэтому случился реадaptационный синдром. Прибыв оттуда, я доложил А.И. Бурназяну всю обстановку. Потом говорю: «Аветик Игнатьевич, надо очень серьезно все оборудовать. Я видел мягкую посадку. Да, ложементы хорошо работают, все под них подстроено. Но не такая уж эта посадка мягкая и совсем не безопасная». Он спрашивает: «Что тебе надо?» Я ему выложил целый список. Он написал во все инстанции: «Обеспечить». Хотя, надо сказать, далеко не все были с этим согласны.

В итоге в вертолете МИ-8 организовали мини-операционную. В этом отношении военные меня поддерживали. Из-за этого пришлось из брюшка вертолета демонтировать и удалить один бак с топливом. А это уменьшило плечо работы вертолета. Вместо бака поставили полевой операционный стол, прикрепили наркозный аппарат. Аветик Игнатьевич вместе с Арменом Артаваздовичем



помогли мне получить очень хороший французский дефибриллятор, настоящий, портативный аппарат.

— Пригодилось все это?

— Следующий полет в 1971 г. — В.Н. Волков, Г.Т. Добровольский, В.И. Пацаев. Это был страшный, трагический полет. Разгерметизация произошла в космосе. Экипаж успешно отработал на станции, отстыковался, а дальше надо было отстреливать бытовой отсек от спускаемого аппарата. И в этот момент, когда они находились в космосе на высоте около 150 км, в вакууме, одновременно с отстрелом бытового отсека почему-то отстрелилась заглушка и образовалось отверстие диаметром два сантиметра. Если бы они были в скафандрах, они бы остались живы. Отделались бы контузией. А тут мгновенно из шарика воздух вылетел в космос.

Что произошло внутри? Это подобно эффекту медицинских банок, которые ставят на спину. В банке создается вакуум, и кожа внутри нее



1. Л.Л. Стажадзе (слева) с директором Института медико-биологических проблем академиком О.Г. Газенко.
2. Космонавт В.А. Соловьев сразу после возвращения из длительного полета, Л.Л. Стажадзе стоит слева (1984).



Л.Л. Стажадзе (слева) на месте посадки В.А. Джанибекова и Г.М. Гречко (1985)

становится бурой, потому что поднимается кровь. Можете себе представить, во сколько крат сильнее был этот эффект в их случае. Получился один общий большой синяк. Закипела кровь, вышла из сосудов.

А что увидели мы? Произошла мягкая посадка, и аппарат завалило набок. Это был полет длительностью 24 дня, космонавтов встречали пионеры с барабанами и горнами, представители местной власти с караваями и красивыми девушками. А по регламенту открывать люк должен представитель завода-изготовителя или первый человек, который дошел до этого аппарата. Им оказался врач, десантник. Он вставил ключ, повернул, открыл и видит три черных лица. И он сразу начал кричать: «Врачи, врачи!»

Я, наверное, поставил собственный рекорд по скорости бега со своей тяжелой сумкой реаниматолога. Когда я увидел космонавтов, сказал фразу, которая потом стала общепринятой: «Без признаков жизни». Хотя раньше я ее нигде не слышал. Откуда эта фраза ко мне прилетела, не знаю.

— **Насколько я знаю, вы довольно долго пытались их реанимировать.**

— Вытащить их было непросто. Хорошо, что там были специалисты, которые знали хитрости крепежки ложементов и поясов. Их вытащили, и мы провели сердечно-легочную реанимацию. Я занялся сначала Владиславом Волковым, мои помощники В.П. Леонов и А.А. Лебедев — Георгием Добровольским и Виктором Пацаевым. Я ввел в сердце специальную иглу со шприцем, чтобы доставить туда адреналин. У меня вылетел поршень, и в этом шприце оказалась вспененная черная кровь. Я сразу понял, что это взрывная декомпрессия.

Но мы все равно провели в течение часа весь комплекс реанимационных мероприятий. Спецслужбы снимали все это на киноплёнку. Затем нас погрузили вместе с телами в АН-12 — большой транспортный самолет военно-воздушных сил, в котором есть гермокабина. Она рассчитана человек на восемь. Нас там поместились вместе с телами на носилках 16 человек.

Мы прилетели в Москву на аэродром Чкаловский, как были, перепачканные, и оттуда нас повезли в Военный госпиталь им. Н.Н. Бурденко. Там собралось очень много руководителей, в том числе А.И. Бурназян, Б.В. Петровский, А.А. Бунятян. Армен Артаваздович сразу меня спрашивает: «Ты все сделал?» Я говорю: «Абсолютно все, что мог». — «Ты уверен, что это взрывная декомпрессия?» — «На 100%».

Приехали патологоанатомы, пригласили самых известных, авторитетных. Они начали вскрытие. Пока они ставили диагноз, описывали, мы там сидели несколько часов. Потом к нам зашел А.А. Бунятян и сказал: «Распоряжение начальства: вам дать по машине — и домой. Завтра встречаемся в штабе ВВС. Будем писать все, как было, от начала до конца. А сегодня отдыхайте». Мы с коллегой выходим и говорим: «А если бы диагноз не подтвердился, нам бы сейчас по машине уже не дали...» Но он полностью подтвердился. В этой ситуации уже ничего нельзя было сделать.

— **И с тех пор космонавты всегда приземляются только в скафандрах?**

— Да, иначе возможна травма, несовместимая с жизнью. Но после этого случая сразу встал вопрос о том, что в Институте медико-биологических проблем нужно открывать такую службу. Мне предложили возглавить лабораторию медицинского сопровождения пилотируемых полетов.

— **Насколько я понимаю, больше таких тяжелых случаев не было. Но тем не менее проблемы медицинского характера у космонавтов возникали.**

— Чем больше увеличивалась длительность полетов, тем разнообразнее были наши задачи. Во главе угла оказались проблемы, связанные с повышением трудоспособности во время полета. Просто сидеть и глядеть в иллюминатор было не нужно. Надо было выполнять серьезные программы, выходить в открытый космос. Меня сразу ввели в группу, которую возглавлял Г.И. Северин, генеральный директор завода «Звезда». Это великая, серьезная фирма. Когда я первый раз увидел выходной скафандр «Орлан», спросил Гая Ильича:



Л.Л. Стажадзе делает презентацию своей разработки — надувной палатки, которую впоследствии размещали на месте посадки космонавтов

«Зачем вы меня вызвали? Что я могу сделать?» «Орлан» сконструирован таким образом, что вы пальцем до пальца не можете дотронуться. Каждый участок тела категорическим образом отделен от другого участка тела, как будто голову, руки, туловище поместили в отдельные сейфы. И что я могу сделать, если что-то случится? А мне Гай Ильич говорит: «Ты врач, ты и думай. У меня других забот полно».

— Удалось вам что-то придумать?

— Я засел за старую медицинскую литературу. Я понял, что у меня здесь не будет возможности серьезной диагностики, и начал изучать заметки земских врачей. И постепенно сообразил, как можно, не касаясь человека, предотвратить сердечные или дыхательные нарушения.

Например, если вы вдруг почувствуете, что вам плохо с сердцем, а рядом никого нет, надо начать сильно кашлять. Тогда у вас увеличивается приток крови к сердцу. У меня был такой классический случай во время программы «Союз» — «Аполлон» на посадке по чисто техническим причинам. Космонавту А.А. Леонову стало плохо. Он побледнел, у него появился легкий пот. А он физически поразительно сильный человек. У него был огромный объем легких, самый большой в отряде. Медвежья сила, а дыхание он мог задерживать чуть ли не на пять минут.

А тут плохо человеку. В это время к нему уже бегут американские и наши репортеры. Я говорю Алексею: «Глубокий вдох изо всех сил. И выдох с кашлем». Это так называемая модифицированная проба Вальсальвы. И он вдруг розовеет. В это время подходят корреспонденты, и он дает

интервью вместе с В.Н. Кубасовым, как ни в чем не бывало. Есть методики, когда можно, стимулируя ладонь пальцем или пощипывая мочку уха, уменьшить головную боль, снизить артериальное давление.

— Это что же, китайская медицина?

— Нет, не совсем китайская. Есть органический компонент любого патологического процесса. И есть перифокальный отек. Вот почему иногда бывают хорошие результаты у разного рода знахарей, экстрасенсов. Это называется «эффект бубна». Он помогает выбрасывать внутренние амины, эндорфины, и у человека уменьшается перифокальный отек. Ему становится лучше. Причем такое улучшение может быть решающим. Его будет достаточно для того, чтобы человек не погиб. Были моменты, когда мы во время полета применяли лекарственные препараты. Подобных историй множество. Когда я работал в космической медицине, почему-то считалось, что в любом случае надо сказать, что полет проходит нормально, самочувствие отличное.

— Это неправильно?

— Я считаю, что этим был нанесен ущерб. Только сейчас многое открывается. Например, как несладко пришлось П.И. Беляеву и А.А. Леонову, когда они приземлились в глухой тайге, а было объявлено, что они находятся в санатории. Они остались в живых благодаря своей смекалке. Во время полетов часто случались нештатные ситуации, в том числе связанные со здоровьем. Надо было, наоборот, описать, какие ребята молодцы, что и как они сделали, чтобы избежать досрочной посадки. Обман обычно дорого стоит.

Постепенно наша лаборатория расширялась и превратилась в отдел. Надо было разрабатывать новые технологии оказания помощи. Появился гораздо более серьезный список лекарственных препаратов. Мы продолжали вместе с космонавтами летать на подготовку. Это помогало нам изучить их физиологические особенности, степень выносливости, умение восстанавливаться. В космосе очень важна способность к адаптации, помимо того что вы можете выдавать запредельные физические параметры и преодолевать физические нагрузки. Чем быстрее вы восстанавливаетесь, тем лучше. Это так называемый внутренний резерв человека. Началась серьезная научная работа, пошли защиты диссертаций. У меня была очень хорошая команда. В частности, В.В. Богомолов, сейчас он доктор наук, профессор, заместитель директора Института медико-биологических проблем РАН. И.Б. Гончаров, тоже доктор медицинских наук, профессор. К сожалению, в прошлом году он умер от коронавируса.

— **Знаю, что вам и психологом приходилось поработать...**

— Всякое случалось. Например, однажды во время длительного полета поссорились два космонавта. Такое бывает, но, как правило, проходит полчаса, час и все это забывается. А тут поссорились всерьез. Это уже начало сказываться на программе. Собрался коллектив. А.С. Елисеев тогда был руководителем Центра управления полетами. Попробовали с ними поговорить, вразумить. Устроили внеплановый сеанс связи с семьями. Пригрозили, что будем досрочно сажать. Ничего не помогает.

— **А психолога в группе не было?**

— Психолог был со стороны военных. Он предложил устроить сеанс связи с генеральным секретарем ЦК КПСС Л.И. Брежневым. Но этот вариант сразу отвергли.



После возвращения миссии «Союз» — «Аполлон» (1975). На фото запечатлен момент, когда Л.Л. Стажадзе спрашивает у В.Н. Кубасова: «Что с Леоновым?»

И вдруг А.С. Елисеев сердито на меня смотрит и говорит: «Ну а что же медицина сидит и молчит?» Я отвечаю: «Алексей Станиславович, мне сейчас на ум пришла такая история. Однажды Аристотель обратил внимание, что его ученики начали ссориться друг с другом. Вечером, уходя, он задал им не совсем корректный вопрос и велел к утру подготовить ответ. Они решили, что он сошел с ума, и всю ночь ломали головы, что же им сделать. В результате они совершенно забыли о своих расправах».

Я предложил дать космонавтам такое задание и дожидаться, когда они уйдут на «глухой» виток (тогда такие витки продолжались до полутора часов). А.С. Елисееву идея очень понравилась. Так и сделали, дали какую-то странную команду. Какую, я, честно говоря, не помню. И когда пришло время для нового сеанса связи, оба, перебивая друг друга, орали, что мы сошли с ума, что мы хотим погубить станцию. Так они объединились в своем негодовании и перестали обижаться друг на друга.

— **Леван Лонгинозович, как вы считаете, нужны ли пилотируемые полеты? Или пусть в космос летают роботы? Ведь это намного безопаснее.**

— Космонавтика должна быть разноплановой и разнообразной. Далекий космос сегодня надо исследовать с помощью аппаратов. Но что касается наших ближайших спутников, здесь надо двигаться к человеческим поселениям. Нужно расширять границы своего мира, приходя туда, где не ступала нога человека. Это необходимо делать еще и потому, что Луна — отличная стартовая площадка для дальнего космоса. А вообще космические технологии — всегда мощный рывок вперед. Это решение огромного количества новых технологических задач, которые потом применяются в обычной жизни.

— **Общаетесь ли вы с космонавтами, поддерживаете ли отношения, просят ли они у вас совета?**

— Конечно, поддерживаем, созваниваемся, жалуемся друг другу на состояние здоровья. Иногда и совета спрашивают. У нас очень хорошие отношения. В прошлом году мы праздновали 85-летие В.В. Аксенова. И меня посадили за один стол с В.А. Джанибековым и В.П. Савиных. Мы сидели, смеялись, вспоминали. И тут я говорю: «Я понял, почему меня к вам посадили». Они переглядываются: «Почему?» А я им: «Потому что мы с вами коллеги по профессии». Они сначала не поняли, и вдруг В.А. Джанибеков говорит: «Правильно! Мы же реанимировали станцию "Салют-7", а ты реаниматолог».

Беседовала Наталья Лескова

Картина Л.А. Мясниковой «Ad astrum / К звезде»





НАУКА И ИСКУССТВО

ВСЮДУ БЕСКОНЕЧНОСТЬ

Художница с естественно-научным
образованием **Любовь Андреевна Мясникова**
создает философские картины о космосе





Л.А. Мясникова в своей мастерской

РОДОМ ИЗ ДЕТСТВА

Рисовала я, сколько себя помню. В роду у нас были художники, поэтому родители отдали меня в художественную школу. Но я ее не окончила, и меня отправили в физико-математическую школу им. И.В. Курчатова.

Мне удалось застать остатки советской системы образования. Я оканчивала Московский государственный университет прикладной биотехнологии. По образованию — инженер-биотехнолог. Идея заниматься биотехнологией возникла еще во времена учебы в школе. Наверное, все мы родом из детства. В юности мной владела фантастическая идея, что, занимаясь биотехнологиями, можно спасти людей от голода и эпидемий — придумать универсальный способ накормить всех голодных, создать вакцину от всех болезней.

Но постепенно иллюзии развеивались. Я поняла, что это не мое место. У меня бы не получилось достичь каких-то заметных результатов. Тут и вспомнилось увлечение рисованием, которое никуда не делось.

СТЕКЛЯННОЕ ИСКУССТВО

Не помню, когда родилась идея необычной техники, в которой я работаю. На эсперанто *vitro* — «стекло», *arto* — «искусство». Стекло — искусство, *VitrArto*. Странно, что до меня никто не додумался соединить эти два простых корня. В какой-то

момент я поняла, что мне комфортно так подписывать свои работы.

Имея диплом инженера, я подумала, что нужно получить практическое художественное образование. И я решила, что если займусь графическим дизайном и иллюстрацией, то, наверное, смогу найти свое место в жизни. И отправилась в Британскую высшую школу дизайна, где получила массу знаний и навыков. Правда, и здесь до конца не дошла, в середине обучения встал вопрос: делать живые интересные проекты или писать дипломную работу. И я выбрала практику.

Когда меня спрашивают, что это за техника, как она появилась, я смеюсь: если инженера пустить в художественный магазин, он много чего насочиняет. Очень здорово, что в институте у меня было так много химии — биохимия, коллоидная химия, аналитическая химия, физхимия...

Это дало некую базу, помогающую работать с разными материалами, из которых создаются краски. Если чередовать слои красок — водорастворимые и те, которые создаются с помощью растворителей, — они просто не взаимодействуют. Они полимеризуются, и их можно накладывать друг на друга. Часто художники, не зная химии, боятся таких экспериментов. Нередко они находятся в жестких рамках каких-либо техник. Я не обременяю себя этими условностями и работаю так, как мне нравится.

В НАЧАЛЕ БЫЛА ИДЕЯ

Визуализации всегда предшествует идея. Она может быть сугубо практической, может быть философской. Затем появляется эскиз, сначала маленький, потом я его увеличиваю, переносу на стекло. А дальше начинается самое интересное — работа со стеклом. Меня подкупает возможность современных красок и материалов создавать объемные рельефы.

У меня в детстве было очень слабое зрение, я долго носила контактные линзы и очки. Для меня возможность фактурно и текстурно что-то прощупать стала необыкновенно важной. С тех пор я «болею» рельефами и фактурами. Художники говорят, что фактура — это кожа живописи.

Но мы живем в XXI в., мне сделали операцию, и теперь зрение отличное. Однако техника уже родилась. И так, слой за слоем, создается рельеф, объем. Он красится, наносятся тона. И все это обретает вид объемной работы, каждая из которых для меня наполнена особым смыслом.

КОСМОС

Свои работы я условно разделяю на серии. Одна из них — «Космос». Среди «космических» работ — «Ad astrum / К звезде». На ней обезьяна в скафандре на фоне звездной карты с благоговением и трепетом взирает на небо. В руках у нее игрушка — космическая ракета.

Этим образом я не хотела никого обидеть. Я преклоняюсь перед первыми космонавтами, открывшими человечеству путь к звездам. Это настоящий героизм — идти туда, откуда можешь не вернуться. Но кто-то должен быть первопроходцем.

В чем смысл работы? Раньше про наш мир говорили — мир подлунный. То есть мир людей — это то, что под Луной, а дальше, выше, за Луной — это мир горний, мир высокого и прекрасного. В чем тут подвох, прелесть и юмор? В том, что человек до сих пор не переступил эту лунную границу. Люди побывали на Луне в 1969 г., больше полувека назад, и больше там не высаживались.

Мы очень хотим чувствовать себя царями природы, покорителями, но на самом деле нам до этого чрезвычайно далеко. Наши технологии, даже самые продвинутые, — игрушки в наших руках, причем нередко опасные.

Мы тянемся в космос с помощью аппаратов, шлем сигналы с телескопов, прощупываем космос во всех возможных диапазонах. Мы картировали небо, измерили Вселенную, описали ее архитектуру, рассортировали звезды по массам, возрастам, описали их эволюцию. Но вот эту лунную границу до сих пор не перешагнули. Мы говорим, что нельзя вечно жить в колыбели, но по-прежнему в ней находимся.



«Новости медицины»

Перспектива вырваться за эти пределы — палка о двух концах. Это великая мечта человечества и моя лично. Но и большая ответственность. Идея, что мы улетим туда, где хорошо и светло, провоцирует небрежное отношение к своей планете. Зачем нам туда лететь? Чтобы превратить в помойку другую планету, как мы делаем со своей? Уверена, что для таких полетов нужен не только иной технический, но и другой духовный, нравственный уровень.

ЧУЖОЙ

Нельзя забывать и о том, что космос — враждебная среда. Он для нас чужой. Космос таит массу опасностей для человека. 5 бэр, биологический эквивалент рентгена, — это годовая норма для сотрудника атомной станции, 10 бэр — для космонавта, который работает на МКС. Это при том, что они летают в верхних слоях атмосферы. Все, что выше, — сумасшедшая радиация. А если лететь до Марса, человек получает дозу порядка 50 бэр.

Сейчас модно говорить о колонизации Марса. Но вы представляете, как выглядит человек, который полгода провел на орбите? Он выходит из аппарата, и его на носилках несут в реабилитационный центр. Он не может ходить. Человек, который полгода летел до Марса, прилетает туда с онкологией. И в таком состоянии он должен заниматься научной деятельностью.

Более того, жить на поверхности нельзя, он должен закопаться в грунт и из бункера руководить работой аппаратов. Зачем? Каждый килограмм, улетающий за пределы Земли, стоит огромных денег. Человеку нужны жизнеобеспечение, кислород, тепло, защита от радиации. Это огромная масса. Гораздо честнее понимать свои ограничения и отправлять вместо людей аппараты.

При этом я ни в коем случае не хочу отказываться от идеи пилотируемых полетов — это то, что должно двигать человечество вперед. Но сейчас мы к этому не готовы.

КОСМИЧЕСКИЙ МУСОР

На другой моей картине изображена старая, ржавая машина, парящая среди звезд. Этим образом я попыталась проиллюстрировать проблему космического мусора, которая уже сегодня чрезвычайно остра и актуальна. Илон Маск сейчас строит сеть спутникового интернета, собирается запускать на орбиту огромное количество спутников. Но там уже летает много всякого безобразия. Мусор на орбите вокруг Земли движется со скоростью пули, выпущенной из автомата Калашникова. Даже маленький пятисантиметровый кусочек, влетая в спутник, превращает его в космический мусор.

Я считаю, что человек несет большую ответственность за то, что он после себя оставляет в космосе. Увы, я не видела еще ни одного проекта, который реально занимается вопросом утилизации космического мусора и очисткой орбиты.

В ПОИСКАХ КОНТАКТА

В старых отечественных фантастических романах пришельцев изображали человекоподобными, умными и добрыми существами. Голливуд же большей частью рисовал их чрезвычайно агрессивными.

Думаю, неправы и те и другие. Вероятно, прав Станислав Лем с его образом мыслящего океана — нечто такое, что мы ни понять, ни постичь не в состоянии. Готовы ли мы к такому контакту? Что будем делать, если встретим такого «брата по разуму»?

Моя работа «К Венере» как раз об этом. Агрессивно настроенное население не сможет создать технологии, которые отправят их в космос. Поэтому я не думаю, что к нам прилетят страшные межгалактические существа. Но и такими, как мы, они не будут. Их мир не для нас. Мы очень узко специализированы. Наша жизнедеятельность существует в маленьком плодородном слое на поверхности планеты. Мы все знаем «Рождение Венеры» Боттичелли. Моя Венера напоминает ее очертаниями, но она иная, потусторонняя, неземная. Любая достаточно высокая технология для нас — волшебство, она кажется чем-то божественным.

Другая моя работа — «Куколка» — примерно о том же: должно произойти какое-то переосмысление, перевынашивание, трансформация. Космос живет непостижимыми для нас цифрами, объемами, расстояниями, и чтобы человеку выйти на этот



Фрагмент работы «Затмение» (вверху);
«К Венере» (справа)

уровень, его сознание должно сделать качественный рывок. Он тоже должен стать иным.

На эти темы рассуждали русские космисты. В частности, К.Э. Циолковский говорил о том, что мы станем звездным человечеством, духами-атомами, которые могут жить в космическом пространстве без скафандров. Это человечество, но иное. Мы сегодня воспринимаем эти идеи как абсолютно утопические. Но не надо забывать, что идея Циолковского о космических ракетах в его время тоже воспринимались как бред. Но сейчас все это работает и летает.



«И вечность в роли
космического мусора»



ТРУДНО БЫТЬ ОПТИМИСТОМ

«На полпути от оптимизма», или просто «Оптимист», — картина, где мы видим летящую с помощью различных приспособлений обезьяну. У этой обезьяны все не очень хорошо: отваливается винт, дымится крыло, но она смотрит вперед и не думает о плохом. Причем смотрит через перевернутую подзорную трубу. Взгляд ее искажен. Но она продолжает лететь. *Age quod agis* («Делай свое дело» (лат.). — Примеч. ред.).

Для меня это не просто шуточная история. Она иллюстрирует посыл, что есть люди, которые продолжают работать, несмотря ни на что, не теряя своего устремления. Да, в любой момент это все может рухнуть и они не долетят до своей цели. Но останется опыт. И следующий смельчак сделает по-другому — может быть, он будет смотреть в нужный конец трубы и его конструкция выдержит. И он долетит.

«На полпути от оптимизма»
(«Оптимист»)

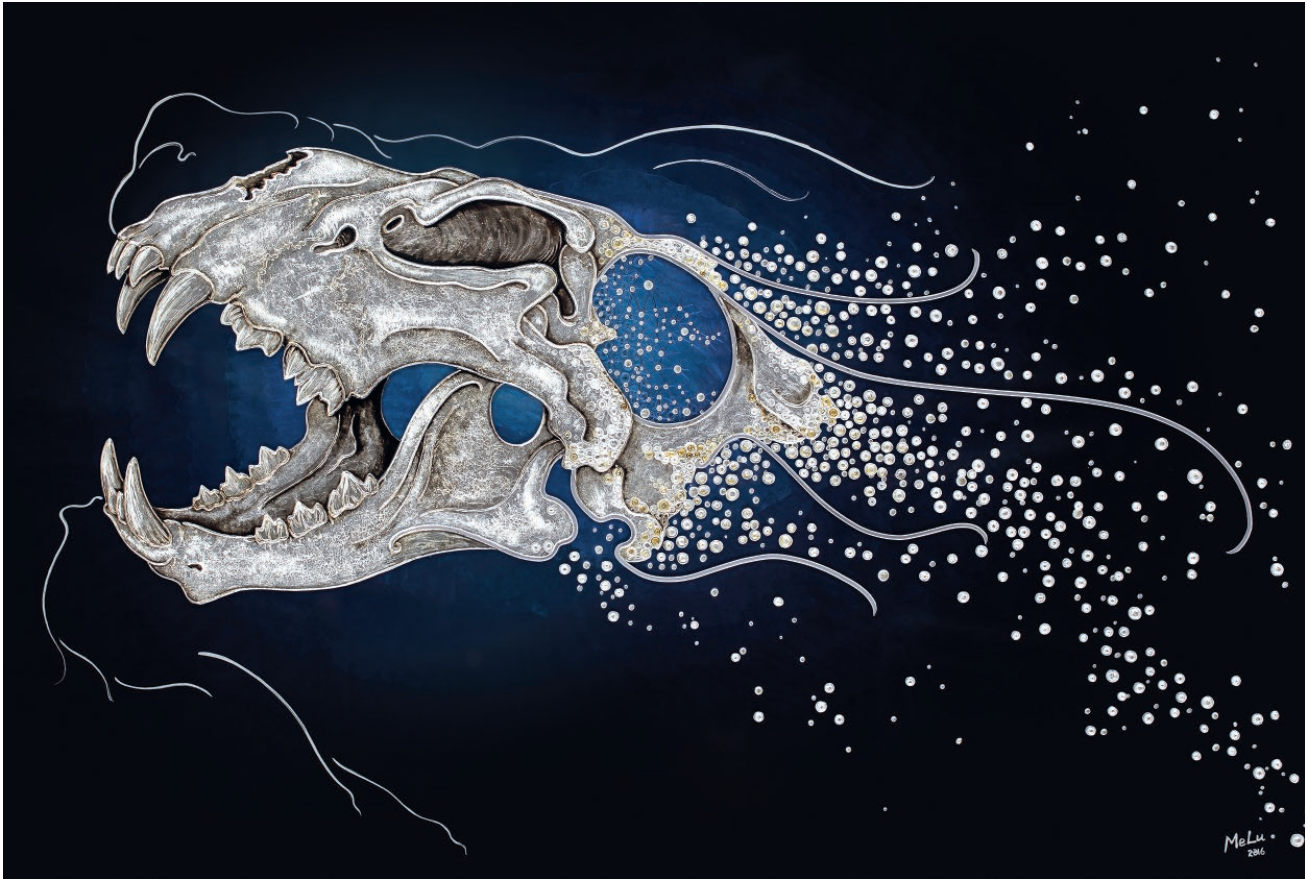


ДЕТИ ГАЛАКТИКИ

Как только в школе началось изучение термодинамики, нам в голову вкладывали, что энтропия нашего мира нарастает, все стремится к хаосу. Но мы видим, что все окружающее своим существованием пытается противостоять этому хаосу. Если говорить об эволюции звезд, то в какой-то момент горения звезды в ней накапливается большое количество разнообразных химических элементов, звезда догорает, коллапсирует, образуются звездная пыль, планетные диски и мы с вами.

Удивительная волнообразность энтропийных явлений, и на этом фоне — чудо зарождения жизни. Это невероятно и непостижимо. Сам факт того, что мы с вами состоим из звездной пыли, поражает. Выходит, мы эту энергию и эту звездную пыль, как некий строительный материал, берем взаймы у Вселенной, а потом должны отдать обратно. Об этом — моя картина «Энтропия».

Без хаоса не будет порядка. Без энтропии нет гармонии. Этот мир — удивительные качели. Но мне безумно приятно чувствовать себя частью Вселенной, понимать, что я состою из материала, который когда-то принадлежал кому-то другому и когда-нибудь уйдет к кому-то другому. Мы —



«Энтропия»

Без хаоса не будет порядка. Без энтропии нет гармонии. Этот мир — удивительные качели. Но мне безумно приятно чувствовать себя частью Вселенной, понимать, что я состою из материала, который когда-то принадлежал кому-то другому и когда-нибудь уйдет к кому-то другому

дети Галактики. И мы вечны, потому что состоим из тех материалов, которые существуют миллионы и миллиарды лет. Куда ни глянь, всюду бесконечность.

Говоря об обезьяне, я на самом деле говорю о том, что осознание своих границ уже чуть-чуть их расширяет. Мне очень нравится стела на ВДНХ, символизирующая стремительный взлет. Это лучшее описание того, что произошло 60 лет назад. Если сравнивать скорости, доступные человеку, — сначала пешком, потом на лошади, на автомобиле,

на самолете, на сверхзвуковых скоростях, — мы видим нарастание, а потом качественный рывок. Человек вышел на первую, вторую космическую и рванул в небо. Это же потрясающе! И когда ты летишь на этом первом аппарате в вечность, в бесконечность, это совершенно новая история. Уверена, что таких историй у нас еще будет много. Мы в начале пути. ■

Записала Наталия Лескова



КОСМИЧЕС



ФИЗИКА

КАЯ ЗАГАДКА

Необычайно малая величина космологической постоянной —
одна из самых больших нерешенных проблем физики

Клара Московиц

ОБ АВТОРЕ

Клара Московиц — старший редактор журнала *Scientific American*, освещает вопросы космоса и физики.



Даже в самой пустой пустоте всегда что-то есть.

Если бы удалось увеличить масштаб пустого пространства, одновременно убрав все планеты, звезды и галактики, можно было бы ожидать абсолютного вакуума, но это не так. Вместо этого вы обнаружили бы полную драматических событий сцену, в которой постоянно рождаются и почти сразу умирают частицы.

Квантовая механика, теория, управляющая миром бесконечно малых объектов, не допускает абсолютной пустоты. В любой точке пространства-времени энергия не может быть строго равна нулю — всегда есть место для маневра. Благодаря этому там могут родиться «виртуальные» частицы — в частности, пара из частицы и ее античастицы, которые аннигилируют друг с другом и исчезают столь же быстро, как и появились. Каким бы странным это ни казалось, эффекты виртуальных частиц наблюдались экспериментально в реальном мире. Когда с помощью ускорителя элементарных частиц впервые была измерена масса *Z*-бозона, она немного отличалась от его чистой массы, потому что иногда он превращался в виртуальный истинный кварк — одно из многих наблюдений, доказывающих существование виртуальных частиц.

Эффект от всех этих рождающихся и умирающих частиц — монотонное шипение энергии вакуума, заполняющей космос, которая заставляет расширяться само пространство. Этот активный процесс — наиболее правдоподобное объяснение темной энергии, причины, по которой Вселенная вместо того, чтобы оставаться статичной или даже расширяться с постоянной скоростью, с каждой секундой растет все быстрее и быстрее.

Проблема с энергией вакуума заключается в том, что ее недостаточно. Когда ученые впервые придумали эту концепцию, они подсчитали, что энергия эта должна быть невероятно большой — она должна была расширить Вселенную так сильно и быстро, что ни звезды, ни галактики не смогли бы образоваться. Поскольку ясно, что это не так, энергия вакуума во Вселенной должна быть очень маленькой — примерно на 120 порядков величины меньше, чем предсказывает квантовая теория. Это

как если бы сказать, что нечто весом в 2 кг на самом деле должно весить 2 кг со 120 нулями. Такое несоответствие побудило некоторых ученых называть энергию вакуума «худшим теоретическим предсказанием в истории физики».

Энергию вакуума считают основной компонентой космологической постоянной, математического члена в уравнениях общей теории относительности (ОТО). Огромное несоответствие между теоретически предсказанной величиной энергии вакуума и ее измеренным значением часто называют проблемой космологической постоянной. «Ее обычно рассматривают как одну из самых неудобных, запутанных и сложных проблем в современной теоретической физике, — рассказывает Антонио Падилья (Antonio Padilla), физик из Ноттингемского университета в Англии, потративший 15 лет на то, чтобы ее разгадать. — Это дает основания предполагать, что в нашей картине чего-то не хватает. Я нахожу это захватывающим — так почему бы над этим не поработать?».

Загадка эта привлекла внимание некоторых из величайших умов в физике и породила огромное количество идей для ее решения. В прошлом году Грегори Габададзе (Gregory Gabadadze) из Нью-Йоркского университета, выступая на физическом факультете Браунского университета, в течение часа рассмотрел все концепции, выдвинутые теоретиками на текущий момент. По окончании кто-то из присутствующих задал вопрос, какая из идей ему нравится больше всего. «Ни одна из них», — ответил Габададзе. По его словам, они слишком «радикальны» и требуют «отказа от неприкосновенных принципов».

Однако некоторые физики полагают, что новые теоретические работы вносят свежую струю, вселяющую надежду на выход из тупиковой

ситуации. А недавние успехи в прецизионных лабораторных экспериментах, исследующих гравитацию, а также рождение гравитационно-волновой астрономии вселяют надежду на то, что некоторые из предлагаемых решений проблемы смогут быть наконец подвергнуты экспериментальной проверке — или по крайней мере исключены из рассмотрения.

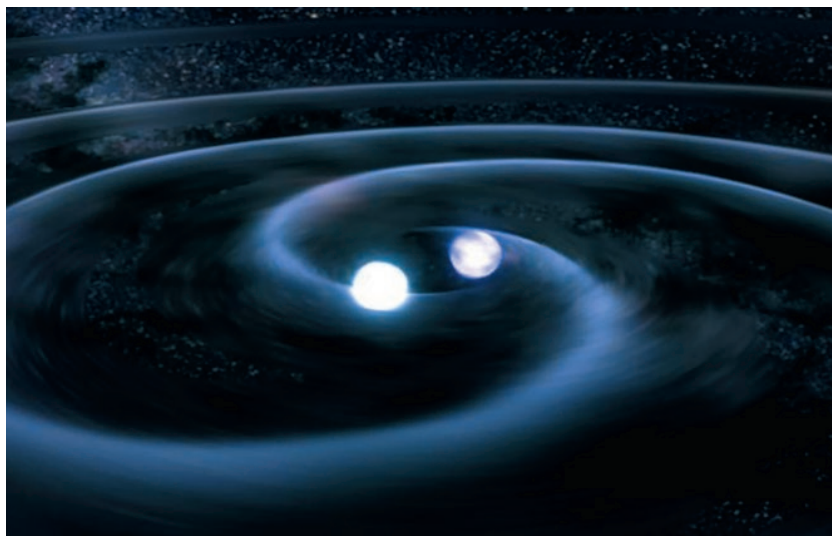
Рождение проблемы

История космологической постоянной пестрит событиями. «Ее резонно можно было бы назвать нерешением непроблемы», — рассказывает физик Рафаэль Соркин (Rafael Sorkin) из Института теоретической физики «Периметр» в канадской провинции Онтарио. Альберт Эйнштейн впервые ввел ее в оборот в 1917 г. как математическую заплатку, чтобы заставить свои уравнения общей теории относительности предсказывать статическую Вселенную, каковой он и большинство ученых ее

в книге истории физики, но она тихо готовилась к возвращению. В конце 1990-х гг. две группы астрономов производили независимые измерения темпа расширения Вселенной. В 1998 и 1999 гг. они опубликовали свои результаты, основанные на наблюдениях особых сверхновых, расстояния до которых можно определять с большой точностью. Самая удаленная из этих сверхновых оказалась гораздо тусклее и, следовательно, дальше, чем предполагалось. Расширение вовсе не замедлялось — его скорость возрастала. Это ошеломляющее открытие принесло трем руководителям групп Нобелевскую премию и побудило космолога Майкла Тернера (Michael Turner) придумать термин «темная энергия» для загадочной силы, вызывающей это ускорение. Физики сразу же предположили, что возможный источник темной энергии — космологическая постоянная, иными словами, энергия вакуума. «В промахе Эйнштейна понимания, пожалуй, было больше, чем в лучших работах простых смертных», — позднее писал Сол Перлмуттер (Saul Perlmutter), один из первооткрывателей ускоренного расширения.

Хотя космологическая постоянная позволила ученым снова привести в равновесие уравнения поля Эйнштейна, заставив их предсказывать ускоряющуюся Вселенную, подобную той, которую наблюдали астрономы, величина этой постоянной физического смысла не имела. Это на самом деле усугубило проблему, что некоторое время вызывало беспокойство ученых. В те годы, когда космологическая постоянная оставалась невостребованной в уравнениях общей теории относительности, физики связали этот термин ОТО с квантово-механической концепцией энергии вакуума. Однако предполагалось, что энергия вакуума колоссальна.

Одним из первых, кто заметил, что что-то здесь не так, был физик Вольфганг Паули, который в 1920-х гг. обнаружил, что энергия эта должна быть настолько большой, что Вселенная должна была расширяться до такой степени, что свет не смог бы преодолеть расстояние между любыми двумя ее объектами. По подсчетам Паули, с Земли «не видно было бы даже Луны». Полученная им оценка якобы позабавила его самого, и в то время никто не воспринял ее всерьез. Первым, кто вычислил значение космологической постоянной на основе предсказаний квантовой теории для энергии вакуума, был физик Яков Зельдович. В 1967 г. Зельдович показал, что вакуум эквивалентен материи с определенной плотностью



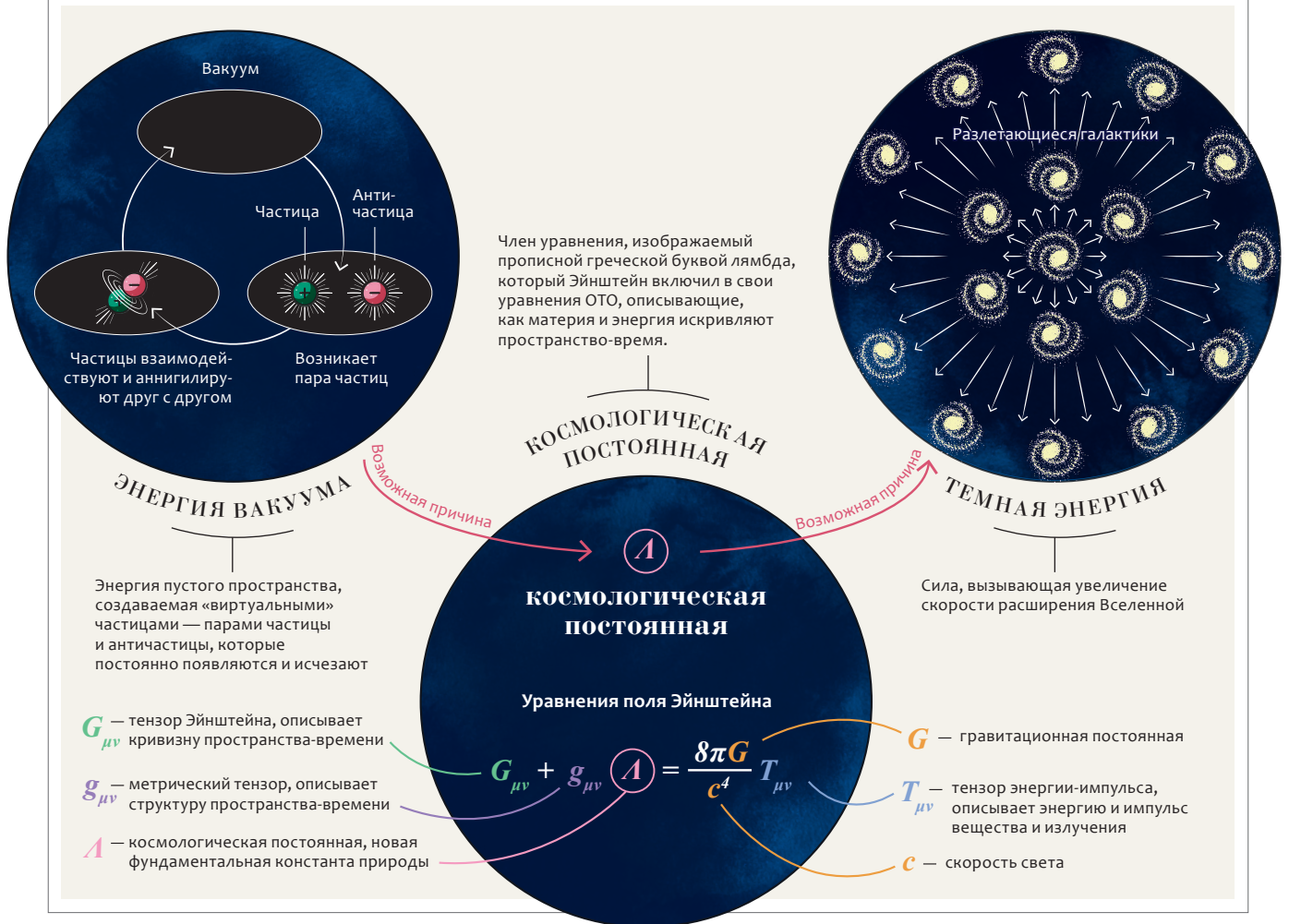
Когда нейтронные звезды сталкиваются, образовавшиеся в результате гравитационные волны могут помочь физикам, занимающимся изучением космологической постоянной

в то время считали. Но в 1929 г. астроном Эдвин Хаббл измерил скорости многих галактик и, к своему удивлению, обнаружил, что все они удаляются от нас; оказалось, что чем дальше галактика, тем быстрее она движется. Его измерения показали, что пространство расширяется повсюду, и куда бы вы ни посмотрели, будет казаться, что все галактики удаляются, потому что расстояние между всеми объектами постоянно увеличивается. Узнав об этом открытии, Эйнштейн несколько лет спустя решил удалить космологическую постоянную из своих уравнений, назвав это, по словам физика Георгия Гамова, своей «самой большой ошибкой».

Какое-то время космологическая постоянная оставалась лишь подстрочным примечанием

Три части головоломки

Проблема космологической постоянной — одна из важнейших загадок физики: величина этой постоянной, представляющей собой часть уравнений ОТО Альберта Эйнштейна, судя по всему, гораздо меньше, чем должна была быть, согласно теоретическим предсказаниям. В основе этой головоломки — три взаимопереплетающихся понятия: энергия вакуума (энергия пустого пространства), темная энергия (причина ускорения Вселенной) и сама эта постоянная.



и сверхсильным отрицательным давлением. Но в то время ученые думали, что Вселенная расширяется с постоянной или замедляющейся скоростью, и большинство полагали, что космологическая постоянная равна нулю. Так родилась проблема космологической постоянной.

30 лет спустя, когда астрономы поняли, что скорость расширения космоса увеличивается, проблема не исчезла. Величина ускорения, хоть и вызвавшая в то время шок, все же была мизерной по сравнению с тем, какой она должна была быть согласно квантовой теории. В некотором смысле возрождение космологической постоянной только усугубило ситуацию. Одно дело — попытаться представить, почему может оказаться, что космологическая постоянная в точности равна нулю. Гораздо труднее понять, почему она может быть

чуть больше, чем ничто. «Ее величина совершенно непонятна, — говорит физик-теоретик Кэтрин Фриз (Katherine Freese) из Техасского университета в Остине. — Даже более непонятна, чем если бы она была равна нулю».

Не все согласны с тем, что проблему эту следует закрыть раз и навсегда. Технически космологическая постоянная представляет собой одну из констант природы, числовой параметр в уравнении, который может принимать любые значения, объясняет Сабина Хоссенфельдер (Sabine Hossenfelder), физик-теоретик из Франкфуртского института перспективных исследований в Германии. Тот факт, что ее числовое значение именно таково, каково оно есть, — дело случая. «Можно было бы просто взять определенную константу и покончить со всем этим, — продолжает

Хоссенфельдер. — Все споры о том, почему она имеет именно такую величину, с научной точки зрения не имеют ни малейшего основания». В квантовой теории поля не было никакой фальсификации, когда ее предсказание не соответствовало результатам астрономических измерений, и теория эта по-прежнему столь же актуальна, как и ранее. «Я полагаю, что большинство членов сообщества космологов и астрофизиков считают это проблемой, потому что им уже давно прожужжали об этом все уши», — отмечает исследовательница.

Тем не менее многие физики не в силах отказаться от этого. Неожиданно малая величина космологической постоянной — нить, за которую следует потянуть. «Меня эта проблема очень беспокоит, — говорит Габададзе, — и я хочу получить ответы на некоторые вопросы».

Изобилие теорий

Несмотря на многочисленные старания физиков добиться ответа на интригующий вопрос, темпы прогресса оставались удручающе медленными. «Прошло уже более 50 лет с тех пор, как Зельдович указал, в чем проблема, но установленного, общепринятого объяснения по-прежнему нет, — говорит Падилья. — Идеи появляются и исчезают, но обычно очень мало что оказывается в сухом остатке».

Предлагаемые решения проблемы космологической постоянной в основном можно разделить на три категории: переписать уравнения общей теории относительности, описывающие расширение Вселенной; модифицировать уравнения квантовой теории поля, которые предсказывают количество энергии вакуума; или вдобавок к первому и второму вбросить что-нибудь совершенно новое.

Корректировкой общей теории относительности можно изменить математическую роль, которую играет космологическая постоянная, или вовсе ее исключить. Например, Фриз и ее коллеги пытались устранить необходимость в космологической постоянной для объяснения ускорения Вселенной, используя другой способ расчета ее расширения в рамках общей теории относительности. «Материи и фотонов, вероятно, будет достаточно и без внесения во Вселенную каких-либо новых компонентов, если изменить их роль в уравнениях», — объясняет Фриз. Ее модель основана на идее, что, помимо наблюдаемых нами трех пространственных и одного временного, от нас могут прятаться дополнительные измерения.

Подход с другого ракурса к обновлению ОТО, называющийся секвестрацией, предложен Падильей и его коллегами. Они видоизменяют теорию Эйнштейна, изолируя гравитацию таким образом, чтобы она не чувствовала воздействия со стороны энергии вакуума. «Не собираюсь делать вид, что это достоверная модель, — добавляет Падилья, — но никто не смог ее опровергнуть».

Но если проблема не в общей теории относительности, то, возможно, она в квантовой механике? Некоторые теоретики предположили, что метод квантовой теории поля для расчета энергии вакуума не работает. Штефан Холландс (Stefan Hollands) из Лейпцигского университета в Германии и его коллеги видят проблему в применении обычных квантовых уравнений к искривленному пространству-времени, утверждая, что они были написаны для плоского пространства. Они уверены, что если бы физикам удалось правильно модифицировать их для случая искривленного пространства, то проблема космологической постоянной исчезла бы сама по себе.

Но для решения проблемы может потребоваться нечто большее, чем математические фокусы с традиционными уравнениями. Одна из недавних неортодоксальных идей — предположение Стива Карлипа (Steve Carlip) из Калифорнийского университета в Дейвисе о том, что пространство-время, по сути, представляет собой «пену». В предложенной ученым модели кривизна пространства постоянно меняется, но в чрезвычайно малом масштабе, намного меньшем всего того, что мы могли бы надеяться когда-нибудь измерить. Вся эта сложная топология компенсировала бы значительную часть влияния космологической постоянной, сделав ее очень малой на локальном уровне. «Это довольно безумная идея, — отмечает Карлип. — Отчаянная мера, впрочем, как и любая другая попытка иметь дело с космологической постоянной, а сейчас отчаянные времена».

Соркин, который убежден, что космическая пена Карлипа — «движение в правильном направлении», также внес вклад в эту область. Он работает над подходом к объединению квантовой механики и теории гравитации, который называется теорией причинных множеств. Согласно этой модели, пространство-время по своей сути дискретно — то есть оно не гладкая непрерывная твердь, а состоит из мельчайших фрагментов, отдельных единиц пространства и времени, которые представляют собой строительные блоки Вселенной, так же как атомы — строительные блоки материи. В этом случае вычисление космологической постоянной включает деление на количество единиц пространства-времени во Вселенной, что приводит к значению, намного более близкому к тому, что наблюдают астрономы.

Одно из самых известных — и, по мнению некоторых, самых плохих — решений проблемы космологической постоянной называется антропным принципом. Согласно его логике, величина космологической постоянной в нашей Вселенной принимает маловероятное значение, но это объясняется тем, что живем мы в Мультивселенной (или Мультимире). Если наша Вселенная — всего лишь один из пузырьков космического моря, в каждом из которых

собственные физические законы и разные константы, то обязательно должен существовать пузырек и с таким значением космологической постоянной. В большинстве других вселенных галактики, звезды, планеты и жизнь не появятся, и поэтому того факта, что мы находимся в одной из таких аномалий, следовало ожидать. Поскольку теория струн требует существования Мультивселенной, работающие в области теории струн физики склонны считать проблему космологической постоянной, по существу, уже решенной путем такого рода рассуждений. Однако другие физики считают подобную философию уловкой. «Это признание в неспособности решить проблему», — уверен Соркин.

Все эти стратегии, как правило, предполагают весьма существенный пересмотр устоявшейся физики. «Каждая из них призывает к серьезному переосмыслению основных принципов, скажем, либо пространства-времени, либо числа измере-

В течение нескольких следующих десятилетий эксперименты должны прояснить вопрос, служит ли космологическая постоянная источником темной энергии

ний Вселенной, — говорит Габададзе. — Все они в каком-то смысле неприятны». Ни одна из теорий не поднялась хоть как-то заметно над остальными. «В настоящее время это становится делом вкуса, — полагает Карлип. — Ответ, вероятно, следует искать в том, о чем никто еще не думал».

Постоянство или квинтэссенция?

Космологическая постоянная остается наилучшим объяснением темной энергии — неведомой силы, вызывающей увеличение скорости расширения Вселенной. Но что если в действительности темная энергия вообще не связана с космологической постоянной или энергией вакуума? Что если энергия вакуума Вселенной каким-то образом полностью компенсируется, а космологическая постоянная равна нулю? В этом случае темная энергия может быть продуктом некоей сущности, называемой квинтэссенцией.

Понятие квинтэссенции было введено в 1998 г. физиками Робертом Колдуэллом (Robert Caldwell), Полом Стейнхардтом (Paul Steinhardt) и Рахулом Дейвом (Rahul Dave) как альтернативное объяснение ускоряющегося расширения Вселенной. Квинтэссенция — это вид темной энергии, который описывается не фундаментальной постоянной (космологической постоянной уравнений

Эйнштейна), а новым физическим полем, обладающим определенным уравнением состояния. Для квинтэссенции в этом уравнении состояние отношение давления к плотности есть величина больше -1 и меньше 0 . Если же это отношение меньше -1 , то темная энергия носит название фантомной. Плотность фантомной энергии с расширением Вселенной бесконечно возрастает, что приводит к «Большому разрыву», когда силы антигравитации в далеком будущем оказываются способными разорвать не только гравитационно связанные системы, но даже атомы. Возможны также комбинированные модели, в которых отношение давления к плотности зависит от времени.

Чтобы проверить, вызвана ли темная энергия новым физическим полем или космологической постоянной, ученые должны понять, как уравнение состояния темной энергии меняется со временем. Различные проекты собирали данные о скорости расширения Вселенной в разные космические эпохи. Один из примеров — проект «Карта темной энергии» (*Dark Energy Survey*), продолжающийся шесть лет, цель которого — с помощью Телескопа им. Виктора Бланко в Чили нанести на карту большую часть неба галактики, находящиеся от нас на различных расстояниях. Данные наблюдений получены, но ученые все еще их анализируют — и пока все признаки указывают на то, что темная энергия реализуется в виде космологической постоянной. Другой способ узнать, существует ли поле темной энергии, — поискать доказательства того, что эта энергия вызвала изменение фундаментальных констант природы с течением времени. Никаких указаний на непостоянство констант пока не выявлено.

В течение нескольких следующих десятилетий эксперименты должны прояснить вопрос, служит ли космологическая постоянная (и стоящая за ней энергия вакуума) источником темной энергии. Программа «Исторический обзор пространства и времени» (*Legacy Survey of Space and Time*), которую планируется начать в 2022 г. на строящемся в настоящее время в Чили телескопе Обсерватории им. Веры Рубин, должна значительно улучшить точность текущих измерений истории расширения Вселенной. Возможно, уже скоро ученые смогут гораздо четче сказать, есть ли в их данных место для квинтэссенции или фантомной энергии или же существует новая фундаментальная физическая постоянная — 1 -член.

Рябь пространства-времени и нейтронные звезды

Если, как это статистически соответствует наблюдательным данным, темная энергия все-таки описывается космологической постоянной, то все еще остается некоторая надежда разобраться в различных предлагаемых объяснениях ее неожиданной

малости. Предстоящие эксперименты и астрономические наблюдения, возможно, предложат способ понять, какие теории развивать, какие отсеять, а каким, может быть, оказать поддержку.

Пять лет назад ученые получили в свое распоряжение принципиально новый телескоп для изучения космоса, когда они начали регистрацию гравитационных волн — «ряби» пространства-времени, возникающей в результате гравитационного взаимодействия черных дыр и нейтронных звезд в двойных системах. Гравитационно-волновые обсерватории, такие как *LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, Лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория)* в США и *Virgo* в Европе, теперь регулярно регистрируют волны, вызванные космическими катаклизмами, и, возможно, волны эти окажутся полезными для исследования природы энергии вакуума. Ряд попыток решить проблему космологической постоянной основаны на модификациях общей теории относительности, которые могли бы, например, заставить гравитацию распространяться немного медленнее скорости света. Тот факт, что гравитационные волны от одних и тех же событий, судя по всему, прибывают одновременно со светом, опровергает эту гипотезу, и уже несколько теорий были отвергнуты. «Десять лет назад у нас была модель под названием "Великолепная четверка" (*Fab Four*), целью которой было решение проблемы космологической постоянной, — рассказывает Падилья. — Я сам уже начал сомневаться в ее состоятельности, но данные гравитационных волн окончательно ее убили».

По мнению некоторых ученых, гравитационные волны также обнаруживают странную активность внутри нейтронных звезд. Эти компактные остатки сверхновых сжаты настолько плотно, что их атомы схлопываются, а протоны и электроны, сталкиваясь, образуют вещество, почти полностью состоящее из нейтронов. Это причудливое состояние порождает странные явления — например, возможно, что ядро нейтронной звезды содержит новую фазу вещества, которая может вызвать скачок содержащейся в ней энергии вакуума. Может быть, гравитационно-волновые обсерватории окажутся чувствительными к гравитационным эффектам локальных излишков энергии вакуума, что потенциально поможет раскрыть природу энергии вакуума.

В то время как астрофизические эксперименты ищут ключи к разгадке на космических просторах, эксперименты в наземных лабораториях также могут помочь исследователям определиться с гипотезами о космологической постоянной. Так, приборы по исследованию законов природы на малых расстояниях могут оказаться чувствительными к возможным изменениям ОТО, которые предлагаются теоретиками.

Примером может служить работа группы *Eöt-Wash* из Вашингтонского университета, где ученые используют эксперимент с чрезвычайно чувствительными весами для проведения точных измерений силы тяжести. Их инструментом служат торсионные весы — металлический диск с вырезанными в нем отверстиями, который свисает на тонкой проволоке, а прямо под ним находится такой же диск, вращающийся с постоянной скоростью. Они разделены расстоянием, равным примерно толщине листа бумаги, и когда нижний диск вращается, его гравитационная сила заставляет верхний диск вращаться взад-вперед.

Этот чрезвычайно чувствительный эксперимент позволяет ученым отслеживать, как ведет себя гравитация в масштабе до нескольких десятков микрометров. Если гравитационная сила ослабевает на таком близком расстоянии, как предполагают некоторые теории, или если там заметны дополнительные (*помимо обычных трех.* — *Примеч. пер.*) мельчайшие пространственные измерения, группа *Eöt-Wash* их обнаружит. Пока в их экспериментах гравитация в точности следует законам Ньютона и Эйнштейна и никаких скрытых пространственных измерений обнаружено не было, но ученые продолжают совершенствовать свои весы, чтобы исследовать эффект на все меньших и меньших расстояниях между дисками. Даже если группа так никогда и не обнаружит отклонений, связанных с энергией вакуума, это не обязательно станет окончательным вердиктом: возможно, что такие изменения происходят только на расстояниях вне пределов наших возможностей.

«Мы продолжим работу, — говорит Габададзе о попытках экспериментальной проверки гипотезы космологической постоянной. — Каждое поколение физиков, начиная примерно с 1960 г., было свидетелем появления новых решений. Возможно, однажды у некоторых из них появятся предсказания для наблюдений, которые можно будет провести, но в данный момент мы еще не подошли к этому». Несмотря на сложность задачи, он и другие физики все еще надеются решить ее в ближайшее время. Возможно, усилия, предпринимаемые ныне с целью понять проблему космологической постоянной, откроют более глубокие истины квантовой физики и общей теории относительности. Или же ученые найдут какое-нибудь более простое решение проблемы. И даже хотя они ищут решение, которое, может быть, никогда не материализуется, многие физики получают наслаждение от самого процесса этих поисков. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Ливини М., Рисс А. Ребус темной энергии // ВМН, № 5–6, 2016.



ЗАГРЯЗНЕНИЕ КОСМОСА

Новое слово в освоении космоса — запуск частных космических аппаратов — позволит многое прояснить в области, касающейся обеспечения экологичности полетов

Леонард Дэвид и Мартин Росс



Сегодня космическая промышленность развивается стремительными темпами, невиданными со времен высадки человека на Луну. Еще 50 лет назад почти все, что было связано с космосом, финансировалось государством. В XXI в. космические аппараты чаще всего создаются за счет корпоративных инвестиций или средств частно-государственных предприятий.

Не связанная с государством глобальная космическая промышленность все в большей степени развивается и функционирует подобно тому, как эволюционирует авиация в масштабах планеты. Это касается возможности повторного использования комплектующих, организации штатного режима запуска летательных аппаратов, массового производства космических кораблей и ракет-носителей. Согласно прогнозам аналитиков, к 2040 г. вклад

космической отрасли в мировой ВВП превысит однопроцентный порог. Основываясь на реальных данных, можно смоделировать сценарий развития промышленности, где ее авиационная и космическая отрасли будут иметь сопоставимое экономическое значение.

Со времен Второй мировой войны в основе значительной части наиболее продвинутых разработок в области конструирования летательных аппаратов и силовых

ОБ АВТОРАХ

Леонард Дэвид (Leonard David) — ветеран космической журналистики, автор статьи «Лунная лихорадка: новая космическая гонка» (*Moon Rush: The New Space Race*), опубликованной в *National Geographic* в мае 2019 г.



Мартин Росс (Martin N. Ross) — сотрудник некоммерческой Аэрокосмической корпорации, руководитель исследований, связанных с выяснением влияния выбросов аэрокосмических двигательных установок на атмосферу Земли. Один из участников проекта «Оценка разрушения озонового слоя», реализованного в 2018 г. под эгидой Всемирной метеорологической организации.



установок лежат соображения экологичности, особенно это касается проблемы вредных выбросов реактивных двигателей. Сегодня они производят значительно меньше сажи и других загрязняющих воздух веществ, чем 50 лет назад. Усилия инженеров, направленные на снижение выбросов реактивных двигателей, имели большую ценность для авиастроения в целом, поскольку оптимизация процесса сгорания в турбине позволяла довести ее КПД почти до теоретически максимального значения, что уменьшало расход топлива. Это было выгодно авиакомпаниям и благоприятно сказывалось на экологии планеты.

Вопрос экологичности не представляется серьезной проблемой при развитии космических систем. Ракетные двигатели, как и реактивные, выбрасывают в атмосферу самые разные газы и частицы, что может приводить к негативным локальным и даже глобальным последствиям. Но при этом воздействие ракет-носителей на окружающую среду обычно не учитывалось. Разработчики ограничивались простым сравнением расходов топлива реактивными двигателями и ракетами.

Соображения по этому поводу выглядят следующим образом: ракетные двигатели сжигают лишь 0,1% от того топлива, которое самолеты сжигают ежегодно, поэтому количество их вредных выбросов составляет лишь 0,1% по сравнению с авиационными. Но это не совсем адекватный метод сравнения. Тщательное изучение каждой фазы космического полета показывает, что космические выбросы могут влиять на атмосферу совсем по-другому, чем авиационные, а в некоторых случаях наносят ей значительно больший вред.

В отличие от авиадвигателей выбросы космических аппаратов сказываются на всех слоях земной атмосферы. Выбросы от реактивных двигателей быстро опускаются вниз из тропосферы вместе с атмосферными осадками, а от ракетных попадают в стратосферу и удаляются из нее очень медленно. Они накапливаются годами, «складируясь» в течение четырех-пяти лет. Важно и то, что и без

этого тонкий озоновый слой в стратосфере особенно сильно истончается там, где скапливаются ракетные выбросы.

Перспективы космических путешествий никогда не были столь захватывающими, как сегодня. Достижения в космической отрасли, в том числе создание высокоспециализированных малых космических аппаратов и низкоорбитальных мегаспутников, разработка новых видов ракетного топлива и возможность добычи ископаемых на Луне, стимулируют развитие «нового космоса» XXI в. Эти разработки могли бы воплотить в жизнь давнюю мечту человечества — сделать космические полеты такими же обычными, как и путешествия в воздушном пространстве. Но следуют ли эти новые космические технологии по пути сохранения экологии на нашей планете?

Выбросы вредных газов

Эмитируемые из ракетных и реактивных двигателей вещества состоят в основном из диоксида углерода и водяных паров; их глобальное воздействие хорошо изучено. Выбрасываемый на любой высоте диоксид углерода — долгоживущий парниковый газ (ПГ), добавляемый к и без того имеющимся в атмосфере ПГ. Пары воды представляют собой недолговечный ПГ. Эти компоненты ракетных выбросов составляют небольшую долю в 1% от авиационных выбросов CO_2 и H_2O . Их нынешнее вредное воздействие невелико, однако некоторые малые по объему компоненты выхлопных газов ракетных двигателей вызывают опасение.

Окислитель твердотопливного ракетного двигателя (ТТРД) — перхлорат аммония — содержит хлор, представляющий наиболее серьезную угрозу озоновому слою стратосферы. Отбор проб из шлейфа ТТРД, осуществленный 20 лет назад с помощью самолета *NASA*, показал, что вредные выбросы этих двигателей образуют в озоновом слое минидыры, которые сохраняются в течение нескольких дней после запуска ракеты. Однако эти дыры исчезают по мере того, как насыщенные хлором

шлейфы смешиваются со стратосферными газами, так что суммарное количество хлора, выбрасываемого твердотопливными двигателями ежегодно, оказывается незначительным, а кроме того, этот газ недолговечен по сравнению с хлором, выделяемым пресловутым фреоном (хлорфторуглеродами). Скорее всего, содержащийся в шлейфе ТТРД хлор не несет серьезной угрозы для озонового слоя.

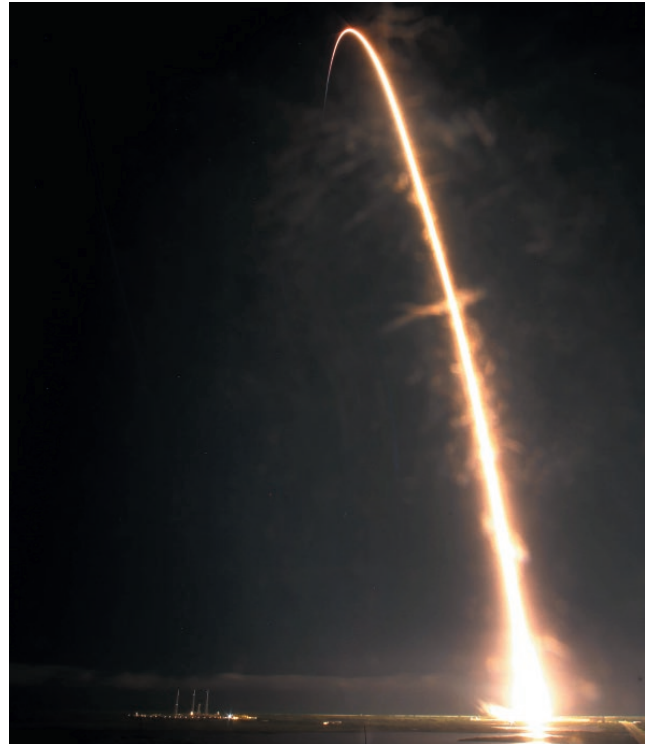
Ученым хорошо известно, как CO_2 , H_2O и Cl , входящие в состав выбросов ракет, влияют на климат на нашей планете и озоновый слой. Как показывают исследования, их вредное воздействие незначительно по сравнению с таковым других источников загрязнения. Даже если уровень ракетных выбросов увеличится на порядок, ничего страшного не произойдет. Однако есть один компонент выбросов ракет, который нельзя сбрасывать со счетов: это частицы сажи и оксида алюминия.

Твердые частицы

За летящей ракетой тянется зрелищный шлейф из продуктов горения. «Пламя» ракетного двигателя на углеводородном топливе состоит в основном из раскаленных частиц сажи, окисляющихся в шлейфе. Ее образование в ракетных двигателях — сложный и не до конца изученный процесс. Сажа образуется в насыщенных топливом камерах сгорания, на стенках сопел и в турбонасосных агрегатах; она частично распадается в горячем шлейфе. У реактивных двигателей не такая сложная конструкция, и они намного экологичнее, чем ракетные силовые установки. Некоторые типы ракетных двигателей, работающих на углеводородном топливе, выделяют в сотни раз больше сажи на каждый килограмм сгоревшего топлива, чем их «родственники» — реактивные двигатели. Реактивные самолеты лишь изредка достигают пределов стратосферы, ракеты же входят в стратосферу при каждом запуске.

Чем опасно наличие частиц сажи в стратосфере? Дело в том, что черная углеродистая сажа интенсивно поглощает солнечный свет. Эта энергия передается окружающему воздуху, что в свою очередь может повлиять на циркуляцию атмосферного воздуха. Поскольку концентрация озона обратно пропорциональна температуре окружающей среды, стратосфера, имеющая более высокую температуру, в большей степени способствует истощению озонового слоя. Достаточно ли велико количество сажи, выбрасываемой двигателями нынешних космических ракет, чтобы существенно повлиять на атмосферу? Этого мы пока не знаем: существующие климатические модели находятся в стадии разработки.

Шлейф ТТРД производит еще большее впечатление, чем шлейф от ракетных двигателей, работающих на жидком углеводородном топливе. Из сопла ТТРД вырываются раскаленные добела частицы



В ноябре 2020 г. пилотируемый космический корабль SpaceX Dragon, оснащенный ракетой-носителем Falcon 9, взял курс на Международную космическую станцию

оксида алюминия, отчего шлейф напоминает языки пламени. Как и в случае с выбросом газообразного хлора, шлейф расплывается и в конце концов смешивается с атмосферой Земли, так что частицы оксида алюминия обнаруживаются в случайных пробах воздуха в стратосфере от экватора до полюсов. В 1990-х гг. исследователи обнаружили, что на поверхности частиц протекают химические реакции, разрушающие озон, но роль оксида алюминия в разрушении озонового слоя неизвестна. Кроме того, ТТРД выбрасывают газообразный хлор, тоже воздействующий на озон. Но в целом механизм влияния выхлопных газов ТТРД на озон изучен недостаточно. В 2018 г. Всемирная метеорологическая организация признала, что в нашем понимании этого вопроса существуют большие пробелы, и указала на необходимость дальнейших исследований в этой сфере.

ТТРД, которыми были оснащены космические челноки, были самыми большими двигателями этого типа, и часто ошибочно полагали, что эра крупных твердотопливных ракет закончилась, когда челноки были «отправлены на пенсию». Однако сегодня ТТРД используются для запуска ракет все чаще. В ноябре 2021 г. ТТРД диаметром 3,66 м, установленные на американской сверхтяжелой ракете-носителе, выведут в космос тяжеловесный аппарат NASA следующего поколения; это будут самые большие твердотопливные ракетные

двигатели в истории. Но и их превзойдет китайский 3,96-метровый ТТРД, дебютный запуск которого запланирован на 2025 г. Тенденция увеличения размеров ТТРД может представлять угрозу озоновому слою стратосферы.

Что взлетает, то и падает

С выходом ракеты за пределы атмосферы Земли загрязнение космоса не прекращается. Вопреки многочисленным публикациям в СМИ о недавнем эффектном возвращении в атмосферу космического мусора, по пути на Землю орбитальный мусор не исчезает и не сгорает. Некоторые элементы и узлы отслужившего свой век и брошенного космического аппарата достигают поверхности планеты. Большинство его деталей испаряются, превращаясь в раскаленный газ, который быстро конденсируется, образуя крошечные частицы. В отличие от частиц с простым химическим составом, выбрасываемых во время запуска ракеты, остатки возвращающегося в атмосферу космического мусора представляют собой целую россыпь сложных химических веществ. На высоте около 85 км топливные баки, электронное оборудование, солнечные батареи и другие элементы конструкции космического корабля испаряются. Продукты этого процесса, опускаясь вниз, скапливаются в стратосфере и смешиваются с выброшенными при запуске ракет сажей и оксидом алюминия. Возвращение в атмосферу сопряжено с таким же загрязнением окружающей среды, как и запуск.

Многочисленные низкоорбитальные спутники, образующие своего рода созвездия, в конце срока службы, при входе в плотные слои атмосферы, будут уничтожены. Предполагается, что ежегодно утилизацию пройдут сотни тонн нефункционирующих спутников. Большая часть этой массы превратится в мельчайшие частицы и останется в средних слоях атмосферы. Относительно образования пыли при входе спутников в атмосферу, а также о ее влиянии на климат нашей планеты и на озоновый слой известно очень мало.

Космическая индустрия вступила в фазу роста, как это было с авиационной промышленностью на заре ее развития. Как только та или иная технология становится составляющей рыночной экономики, возможности ее нового применения стремительно расширяются. И подобно своему старшему брату, авиационной промышленности, космическая промышленность становится источником выбросов вредных газов и частиц в атмосферу в результате работы силовых установок. Насколько по-разному эти две отрасли повлияют на атмосферу Земли — станет ясно после того, как будет проведен сравнительный анализ авиационных и космических выбросов.

В любом случае в обозримом будущем уровень выбросов углекислого газа реактивными двигателями будет существенно выше такового ракетных

силовых установок. Это нашло отражение при расчетах условного углеродного следа для космического пространства. Но CO_2 играет далеко не главную роль в загрязнении космоса. Мельчайшие взвешенные частицы, выбрасываемые при запуске ракет и возвращении космического мусора в атмосферу, приводят к гораздо более серьезным изменениям химии атмосферы, динамических показателей и радиации, чем выбросы CO_2 ракетных двигателей. Углеродный след — это сложная история, пока не получившая четкого определения.

Недавняя дискуссия по поводу яркого свечения низкоорбитальных спутников показывает, что экологичность должна стать фундаментальным аспектом развития космической отрасли. Обеспечивать безопасность эксплуатации космических систем будет проще, если оценивать заранее воздействие на окружающую среду каждого этапа жизненного цикла системы. Именно так рассматривается проблема экологичности в авиационной промышленности. В противном случае приходится прибегать к корректировке. Только всесторонний анализ экологичности до развертывания системы спутников позволит обойтись без нее.

По иронии судьбы именно космос может обеспечить человечеству перспективу, необходимую для управления нашей планетой. Картину, открывающуюся с борта «Аполлона-8» во время восхода Солнца на Земле, часто ассоциируют с началом глобального экологического движения. Но сама проблема выбросов в космос слишком слабо изучена, чтобы ответить на фундаментальные вопросы их воздействия на окружающую среду. Соответствующая научная программа должна включать исследование шлейфов при запуске и возврате аппаратов, детальное моделирование шлейфов от момента недавнего запуска до стационарного состояния глобального перемешивания, а также лабораторное изучение микрофизики частиц, образуемых от запуска до возвращения. Во всех мероприятиях должны принимать участие как государственные, так и коммерческие структуры.

Космическая промышленность становится значимой частью мировой экономики как раз в то время, когда проблема экологичности приобретает глобальный характер. Что будет представлять собой экологичная космическая индустрия? Каковы угрозы делу освоения космического пространства в будущем? Мы не узнаем ответов на эти вопросы, пока не реализуем долговременную международную программу по исследованию вредных выбросов космических аппаратов. ■

Перевод: С.Э. Шафрановский

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Фридман Д. Рождение ракеты // ВМН, № 8–9, 2015.

12+
реклама

10 лет в эфире

И ЭТО ТОЛЬКО НАЧАЛО!



NAUKATV.RU

ТЕЛЕКАНАЛ

НАУКА

№1 НАУЧНО-ПОЗНАВАТЕЛЬНЫЙ ТЕЛЕКАНАЛ В РОССИИ*



1 Нас смотрят
млн. человек в день**

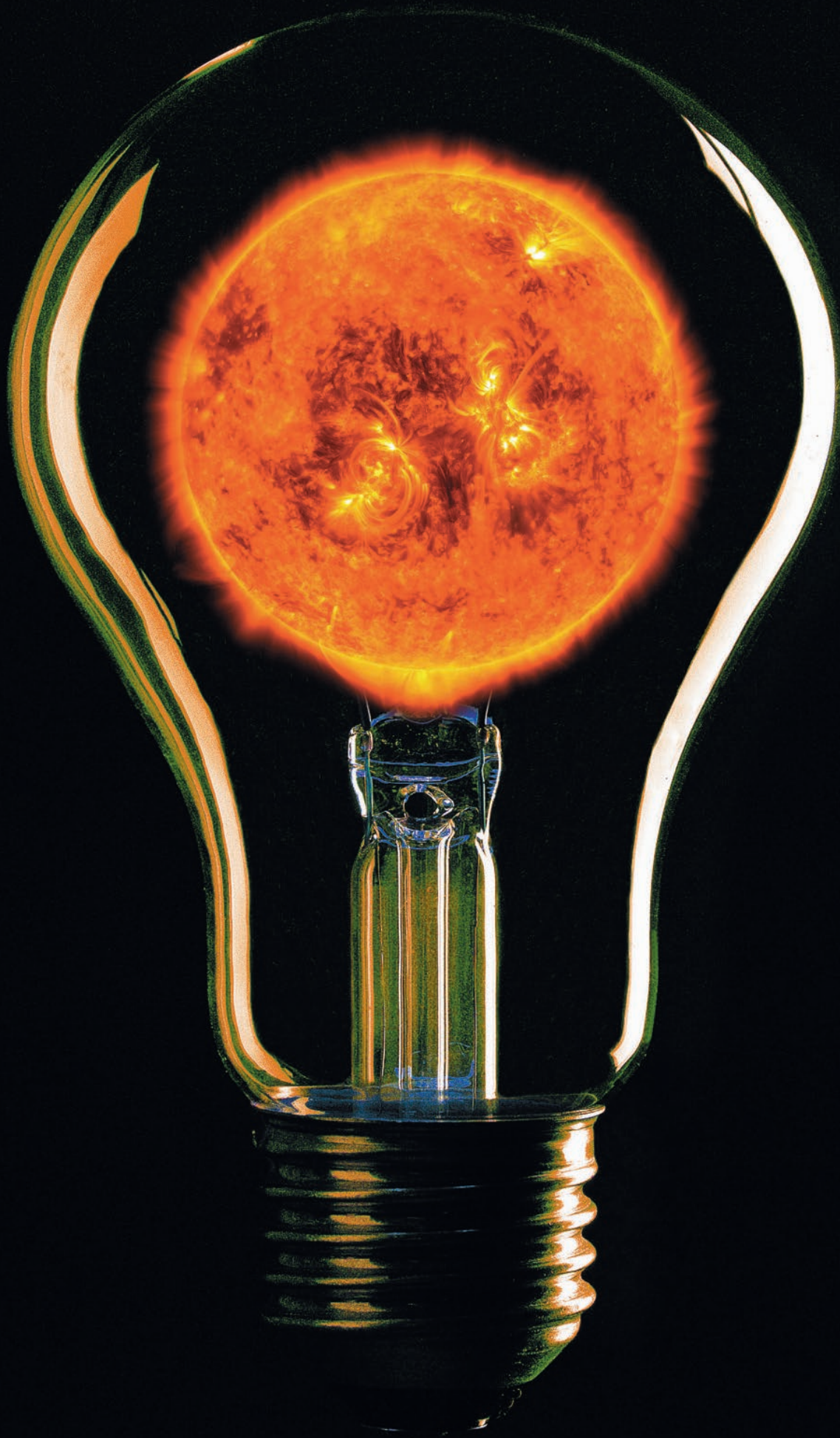


1.9 млн.
подписчиков



Золотая медаль
РАН

* По данным исследовательской компании Mediascope ** Mediascope TV Index Plus, Россия (города 0 тыс+), 2020 год



МАЛЕНЬКОЕ СОЛНЦЕ НА ЗЕМЛЕ

Возможно ли воссоздать на Земле те же процессы, что и на Солнце? Ученые отвечают на этот вопрос утвердительно, и сегодня большие надежды возлагаются на управляемый термоядерный синтез как на главный способ преодоления энергетического кризиса человечества.



М.В. Ковальчук

В

середине XX в. в СССР, в Курчатовском институте были заложены основы термоядерной энергетики, и успешные работы в этой области в нашей стране продолжают-ся до сих пор. Об основных этапах развития этого научно-го направления, о том, зачем человечеству нужен термо-ядерный реактор, почему термоядерный синтез по своей сути — природоподобная технология, рассказывает президент НИЦ «Курчатовский институт» **Михаил Валентинович Ковальчук**.

Человечество развивалось миллионы лет, создавая цивилизацию, в которой мы все сегодня живем, только потому, что мы имеем на Земле колоссальное количество энергии от нашего светила. На Солнце в плазме уже больше 4 млрд лет непрерывно происходит реакция синтеза, когда ядра водорода соединяются, выделяя огромное количество энергии. При этом температура достигает десятков миллионов градусов по Цельсию, а сама плазма удерживается с помощью гравитации.

Еще в 1920–1930-е гг. у ряда ученых возникла мысль: а нельзя ли зажечь такое «искусственное Солнце» на Земле и как это сделать? Ведь даже если предположить, что на установке в лаборатории удастся создать раскаленную плазму с такой температурой (а она должна быть здесь еще выше, чем на Солнце), чтобы началась реакция синтеза, нет материала, который мог бы ее удержать внутри установки и поддерживать эту огромную температуру.

— Когда начались практические шаги в этой области?

— Есть легендарная история о письме сержанта советской армии О.А. Лаврентьева, написанном им в ЦК ВКП(б) в 1949 г., где он предложил идею реализации термоядерного синтеза с помощью удержания плазмы электростатическим полем. Письмо перенаправили И.Е. Тамму, возглавлявшему на тот момент специальную группу по разработке термоядерного оружия. Вместе с А.Д. Сахаровым, входившим в ту же группу, они выдвинули более перспективную концепцию магнитного удержания плазмы.

Так постепенно начало развиваться уникальное направление, связанное с будущими источниками энергии, с созданием «искусственного Солнца» на Земле, — область физики высоких технологий, инженерии, которая называется управляемым термоядерным синтезом (УТС). С его помощью можно воспроизвести процессы термоядерного синтеза, происходящие на Солнце, в созданной человеком мегаустановке — токамаке.

Основные шаги в овладении термоядерной энергией были сделаны в начале 1950-х гг. в Институте атомной энергии, как тогда назывался современный НИЦ «Курчатовский институт». На нашем здании, где работает самый современный на сегодня токамак Т-15 МД, висят памятные доски легендарным курчатовцам, чей вклад в развитие управляемого термоядерного синтеза наиболее велик. Это прежде всего Л.А. Арцимович, М.А. Леонтович, Б.Б. Кадомцев. И, конечно, в этом ряду ныне здравствующий почетный президент Курчатовского института академик Е.П. Велихов — человек-токамак, как его иногда называют. Всю свою жизнь Е.П. Велихов занимается термоядерной энергетикой и стал одной из ключевых фигур в этой области. Он действительно внес неоценимый вклад в развитие УТС, и именно благодаря ему управляемый термоядерный синтез приобрел международный размах в рамках мегапроекта *ITER* (*International Thermonuclear Experimental Reactor*).

В 1951 г. Совет Министров СССР обязал Первое главное управление в лице его знаменитого начальника Б.Л. Ванникова, его заместителя А.Л. Завенягина и, конечно, И.В. Курчатова организовать научно-исследовательские и промышленно-конструкторские работы в области УТС. В Курчатовском институте была создана первая в мире установка для удержания плазмы магнитным полем, которая получила название «токамак» (тороидальная камера с магнитными катушками). Кстати, предложил эту аббревиатуру один из заместителей И.В. Курчатова И.Н. Головин. Этот термин стал международным, как «спутник». Очень удачное название и в том, и в другом случае. А термин «спутник», как мы знаем, уже в 2020 г. обрел еще одно значение — вакцина от *COVID-19*.

Вообще говоря, экспериментальная установка ТМП (тор с магнитным полем), созданная в 1955 г.,

еще не имела такого названия, это был прототип устройства для удержания плазмы. А вот первая в мире тороидальная камера, которая послужила основой для последующей конфигурации таких машин, как токамак, Т-1 с «ловушкой» из магнитного поля, была создана в Курчатовском институте И.Н. Головиным и Н.А. Явлинским в 1958 г. И это был уже настоящий токамак, в полном смысле этого слова. Всего за эти годы в Курчатовском институте было построено более 20 токамаков!

— Очень впечатляющая цифра! Можно немного подробнее рассказать о принципе работы токамака? И почему его иногда называют еще «бублик»?

По рекомендации И.В. Курчатова эти работы возглавил Л.А. Арцимович — выдающийся ученый, участник атомного проекта. Благодаря ему в нашем институте впервые был разработан электромагнитный метод разделения изотопов. Под руководством Л.А. Арцимовича была создана специальная группа для решения проблемы УТС, где М.А. Леонтович руководил теоретическими исследованиями в этой области.

Название отражает внешний вид и суть самой установки: это тор, бублик, внутри него сначала создают вакуум, а затем заполняют его смесью дейтерия и трития. С помощью индуктора в камере образуется вихревое электрическое поле, ток протекает по плазме, нагревая ее до сверхвысоких температур. Дополнительно необходимо окружить вакуумную камеру установками магнитами, создающими в ней тороидальное магнитное поле, которое и удерживает плазменный шнур внутри тора.

Сверхпроводящие кабели, из которых состоят магниты, сплетены из тысяч проволок диаметром менее 1 мм, изготовленных из сверхпроводящих материалов, которые при определенных условиях практически теряют электрическое сопротивление. Токамак — сложнейшая установка, для ее работы необходимы огромные энергетические мощности. К тому же стенки реактора или вакуумной камеры подвергаются колоссальной нагрузке, в ходе которой значительно меняются свойства материалов, из которых они изготовлены. Они охрупчиваются, разрушаются. Требования безопасности крайне высоки, поэтому, начиная работы в этой сверхвысокотехнологичной области, необходимо обеспечить гарантированную надежность процессов на всех этапах.

— И ее действительно можно гарантировать на современном этапе развития УТС?

Выдающиеся курчатовцы, внесшие вклад в развитие управляемого термоядерного синтеза:

Лев Андреевич Арцимович (1);
Михаил Александрович Леонтович (2);
Борис Борисович Кадомцев (3);
Евгений Павлович Велихов (4)



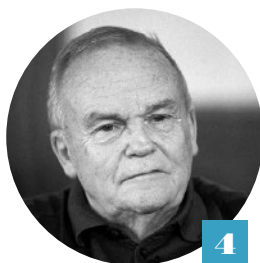
1



2



3

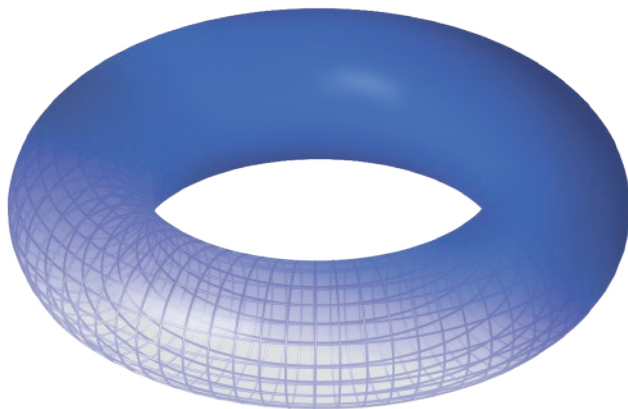


4

— В Курчатовском институте есть все необходимые составляющие для бесперебойной работы токамаков. Во-первых, это своя подстанция, которая обеспечивает огромные потребности в электроэнергии, во-вторых — специальные лаборатории, где производится жидкий гелий, с помощью которого обеспечивается работа сверхпроводящих магнитов. Кроме того, на территории НИЦ «Курчатовский институт» работает цех, где производятся и тестируются сверхпроводящие кабели и для наших токамаков, и для международного проекта *ITER*. И еще в одном нашем подразделении, которое называется «горячие камеры», изучают поведение материалов под воздействием радиации. И не просто изучают, а могут менять свойства этих материалов, продлевать время их жизни с помощью нанотехнологий.

Управляемый термоядерный синтез — это фактически абсолютно природоподобная технология. Ведь создавая сложнейшую технологическую установку токамак, мы воспроизводим процессы, происходящие на Солнце. Надо еще отметить, что температура в его естественном реакторе достигает 15–20 млн градусов по Цельсию, а нам в термоядерном реакторе нужна температура в пять раз выше солнечной (это связано с нюансами физических процессов на Земле). Так вот, если человечество доведет идею управляемого термоядерного синтеза до его бесперебойного осуществления в энергетическом реакторе, то получит неограниченный источник энергии, причем экологически чистый. Ведь как только в термоядерном реакторе перестает течь электрический ток, реакция тут же прекращается. Так что это по своей сути абсолютно безопасная, «зеленая» ядерная энергетика.

— То есть в процессе освоения термоядерной энергии возникла и новая технологичная промышленность по производству сверхпроводников?



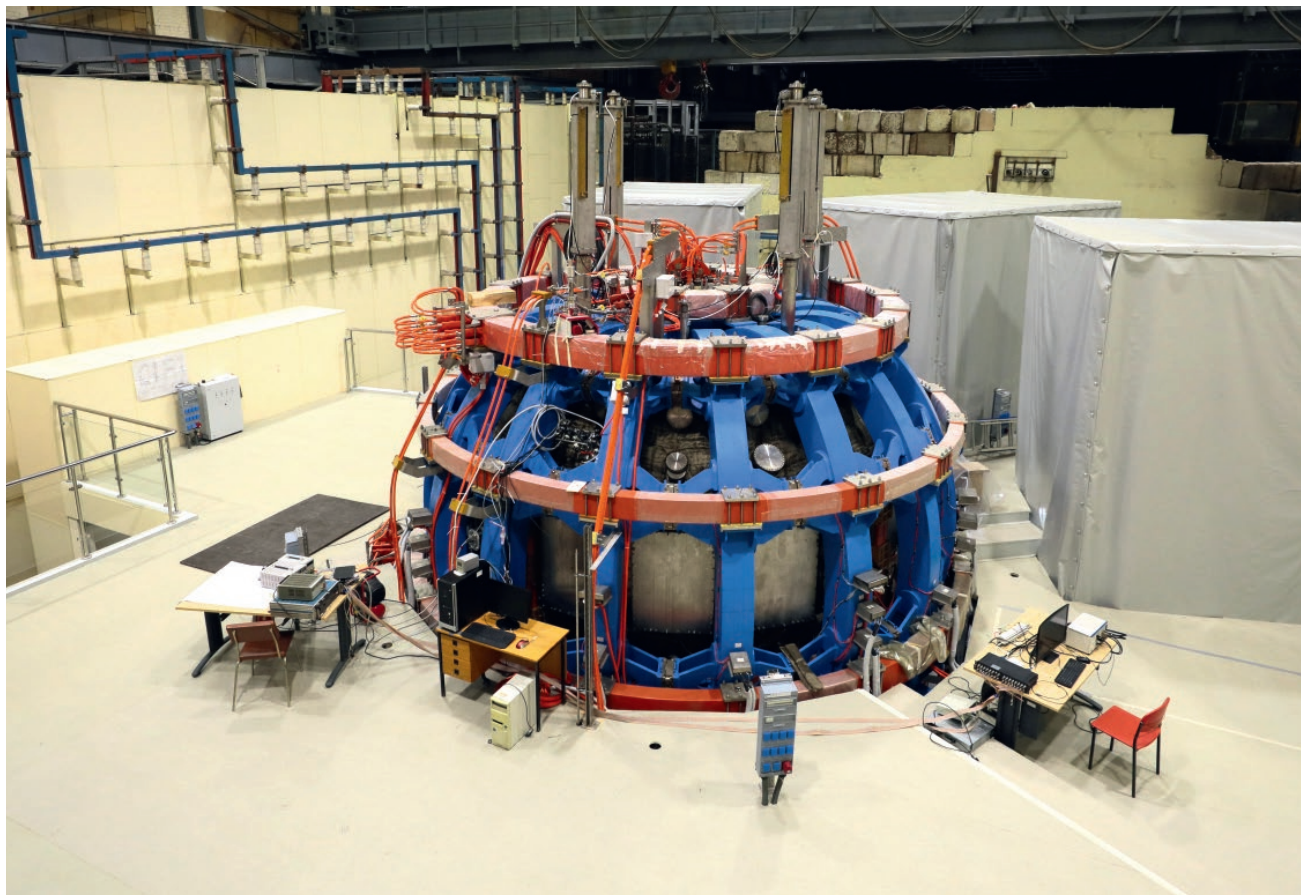
Тор (тороид) — поверхность, получаемая вращением окружности вокруг оси, лежащей в плоскости этой окружности и не пересекающей ее

— Есть вещества, которые при определенных условиях приобретают нулевое сопротивление. Когда ток идет по проводам, он встречает сопротивление и на его преодоление уходят десятки процентов передаваемой энергии. Как мы уже говорили, для того чтобы зажечь плазму, наше «искусственное Солнце», надо подвести огромное количество энергии. Соответственно, смысл создания термоядерного реактора в том, чтобы энергия, которую он будет вырабатывать, была бы не меньше той, которую к нему подвели, чтобы запустить процесс УТС. И если изготовить кабель для передачи этой энергии из материалов, имеющих нулевое сопротивление, это значительно упростит задачу. Первые такие сверхпроводящие материалы были изготовлены на базе низкотемпературных сверхпроводников, которые становятся сверхпроводящими при температуре жидкого гелия. Мы начали выпускать такие сверхпроводящие кабели для токамаков на основе ниобий-оловянного сплава.

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

— Но строительство *ITER* идет уже много лет, а сроки все отодвигаются?

— Проект *ITER* — это не просто создание новой технологии или установки, пусть даже мегауровня, а фактически переход к новым принципам овладения энергией, процессами, происходящими в звездах, когда в земных условиях при слиянии ядер изотопов водорода — дейтерия и трития — выделяется огромное количество энергии. Подобное мы пытаемся повторить и в проекте *ITER*. Повторю, что никогда раньше в мире не строили установок такой сложности. Человечество стоит на пороге ресурсного коллапса, но при этом наши потребности в энергетических мощностях будут



Токамак T15-MD

постоянно возрастать. Очевидно, что для выхода из ситуации необходимо, во-первых, искать новые источники и, во-вторых, снижать потребление. Так что термоядерная энергетика может стать альтернативой многим известным источникам энергии. К тому же уже сегодня из УТС развились сверхпроводимость, плазменные технологии, которые очень востребованы и в медицине, и в космонавтике.

Кстати, тут уместно вспомнить ответ академика Л.А. Арцимовича на вопрос, когда же будет решена задача УТС, мол, она уже в определенном смысле набила оскомину. Лев Андреевич ответил, что, по его мнению, эта задача обязательно будет решена, но только тогда, когда термоядерная энергетика будет совершенно необходима человечеству. Это было сказано в середине 1960-х гг., но и сегодня наша цивилизация еще не дошла до этой грани, живя, так сказать, на старом багаже источников энергии.

Пока у нас нет очевидной альтернативы атомной энергетике, но мы понимаем, что топлива, на котором работают современные АЭС, урана-235, хватит на 50–70 лет. А что будет дальше? Сейчас серьезно рассматриваются проекты гибридного реактора, который сочетает в себе принципы

ядерной и термоядерной энергетике, то есть сможет стать мостиком к переходу на новые принципы генерации энергии. По прогнозам экспертов, ближайшее десятилетие может стать решающим для реализации таких проектов. Крайне важно и то, что ресурсы топлива для термоядерной энергетике — дейтерия и трития — намного превосходят запасы нефти, газа, угля, урана на нашей планете. Дейтерия много в морской воде, а тритий достаточно легко можно получать из лития.

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

— Получается, что международное сотрудничество в области термоядерной энергетике необходимо, раз от создания нового источника энергии зависит выживание человечества. Это возможно, как вы считаете?

— Конечно. Сотрудничество в этой области началось еще в 1956 г., когда в Великобританию приехала наша правительственная делегация во главе с Н.С. Хрущевым, а в ее составе был И.В. Курчатова. Он выступил с докладом в атомном центре

Харуэлл, рассказав о возможности осуществления термоядерной реакции в газовых разрядах на примере работ, уже шедших к тому времени полным ходом в Институте атомной энергии. Это был колоссальный по значимости шаг. Ведь не секрет, что СССР и США шли ноздря в ноздю в атомной гонке, где американцы опередили нас на четыре года, сбросив в августе 1945 г. атомные бомбы на японские города Хиросиму и Нагасаки. А вот в термоядерном оружии первенство было за СССР, который в 1953 г. провел первое в мире испытание термоядерного оружия на полигоне под Семипалатинском. Конечно же, все работы в области УТС были во всех странах засекречены. И вдруг советский физик рассказывает об исследованиях, которые ведет возглавляемый им институт! И.В. Курчатов уже тогда понял, что подобные исследования уровня, как сейчас принято говорить, «мегасайенс», настолько сложные, дорогостоящие, науко- и трудоемкие, что их не под силу вести не то что отдельному институту, но и стране. Конечно, он заручился согласием советского руководства, которое дало добро на прозвучавший из его уст призыв к ученым всего мира рассекретить работы по термоядерной проблематике и начать сотрудничество в области УТС. После этого стали появляться в открытом доступе публикации по этой тематике, начался обмен опытом.

Причем с этим тоже связан интересный случай. На очередном сооруженном в Курчатовском институте токамаке Т-3А в 1969 г. впервые в мире была достигнута температура плазмы в 10 млн градусов по Цельсию и зарегистрирован устойчивый выход термоядерных нейтронов. Об этом успехе Л.А. Арцимович доложил на международной конференции, но встретил откровенный скепсис со стороны коллег из Великобритании. Тогда он предложил им приехать в Курчатовский институт и самим сделать измерения, причем на привезенной ими аппаратуре. Этот визит англичан в закрытый институт состоялся, их измерения полностью подтвердили наш успех. Так что это событие тогда произвело настоящий фурор во всем научном мире. Вообще, в этой термоядерной гонке, развернувшейся в 1960–1980-х гг., Курчатовский институт неоднократно создавал новые установки впервые в мире. Токамак Т-7 — первый в мире токамак со сверхпроводящей тороидальной обмоткой на основе ниобий-титана. На установке Т-10, которая была создана у нас в 1975 г., была достигнута температура электронов в 120 млн градусов, что тоже стало мировым достижением. Для этого были созданы новые уникальные технологии — система дополнительного нагрева в виде гиротронов, которые теперь используются во всем мире. А в 1988 г. в Курчатовском институте заработал Т-15 — первый в мире токамак с циркуляционной сверхпроводящей магнитной системой на основе

ниобий-олова. Действительно, много научных рекордов связано у нас с развитием УТС.

— Известно, что сейчас существует еще и российско-итальянский проект «Игнитор». Зачем он нужен, если еще не завершена ITER?

— Действительно, такой проект есть. «Игнитор» — это проект токамака с сильным полем. Как мы уже говорили, для нагрева плазмы в обычном токамаке нужны колоссальные энергетические мощности. Но если изменить свойства плазмы, сделать ее более плотной, то тогда, пропуская через нее электрический ток, можно добиться того, что нагрев за счет ее сопротивления будет происходить в разы быстрее. «Игнитор» позволяет значительно уменьшить размер термоядерного реактора и существенно сократить энергетические затраты на разогрев плазмы до нужных для начала реакции УТС температур.

Развитие этого международного проекта в последние годы затормозилось по ряду причин, но мы не теряем времени. В Курчатовском институте в апреле этого года пущен модернизированный токамак Т-15МД. В центре камеры здесь находится 12-тонный электромагнит, который иницирует плазменный разряд в мегаустановке. Это прообраз будущего гибридного токамака, который будет наработчиком нового топлива. Наша задача — зациклить процесс, чтобы в итоге плазма сама продолжала подогревать себя с помощью выделяемой энергии. То есть мы сделали еще один шаг к такому термоядерному реактору, который сможет обеспечить человечество энергией, не представляя при этом опасности для нашей планеты, работая по принципам самой природы.

Александр Васильевич Лутченко, *руководитель Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт»:*

— Так в чем же уникальность этого реактора?

— На сегодня эта установка — одна из самых мощных. При этом она достаточно компактна, и в этом ее главное отличие от собратьев. Сейчас в мире для получения высоких параметров плазмы, наоборот, намечается тенденция к увеличению габаритов установок. Пример тому ITER — колоссальная по размерам установка. Мы же попытались создать высокие параметры плазмы на компактной машине. Повышение температуры и давления плазмы будет достигнуто за счет компактности и достаточно высокого тороидального магнитного поля — в этом нам помогут новые технологии, созданные в НИЦ «Курчатовский институт». Несмотря на то что эта установка не сверхпроводящая, здесь применен новый медный проводник, имеющий



А.В. Лутченко

специальный состав. Это ноу-хау позволяет обеспечить очень высокие параметры тороидального магнитного поля, причем в вытянутом сечении. Иными словами, этот модернизированный токамак по сравнению с остальными имеет более вытянутое сечение плазмы, что позволяет получить высокие параметры плотности и температуры плазмы. Уникальность установки еще и в том, что на ней будут отработаны новые энергетические технологии, которые в будущем смогут применяться на гибридных реакторах.

Как я уже говорил, эта установка не имеет аналогов. Здесь будут использоваться практически все системы дополнительного нагрева, которые есть в мире. И основной набор этих систем был придуман в России.

— Гибридный реактор — это смесь атомного реактора и термоядерного?

— Да, можно так сказать. Обычный токамак позволяет получить нейтронный поток, за счет которого нагревается теплоноситель, так же как это происходит сейчас на атомных станциях. По сути своей, атомные станции — это большой генератор тепловой энергии. Если говорить простым языком, это кипяtilьник воды для получения пара, а дальше уже пар вращает турбины генератора и мы получаем электроэнергию. В термоядерной установке, когда мы выйдем на демонстрационные, промышленные реакторы, принцип останется таким же: нейтронный поток будет нагревать теплоноситель, дальше теплоноситель будет нагревать в теплообменнике воду, которая в виде пара будет проходить через турбины и давать электричество. Что касается гибридной технологии, о которой вы спрашиваете, суть заключается в следующем: нейтронный поток будет улавливаться так

называемым blanketом (топливная сборка реактора). Во-первых, в blanket можно помещать торий (которого в земной коре гораздо больше, чем урана) и, облучив его нейтронами, создавать новое топливо также и для атомных станций. Во-вторых, в blanket можно загружать отработанное ядерное топливо с атомных станций и с помощью нейтронного потока получать элементы для производства нового топлива. Становится возможным также переводить долгоживущие радионуклиды (с периодом полураспада в тысячи лет) в короткоживущие с периодом полураспада в десятки лет, что делает процесс их захоронения намного экономичнее.

— То есть получается замкнутый цикл?

— Верно, поскольку это дает большое преимущество в атомной энергетике, ведь запасы урана ограничены, а мы таким образом значительно продлеваем цикл работы существующих атомных станций. В общем, идея заключается в том, чтобы поддерживать в непрерывном цикле уже существующую энергетику.

— НИЦ «Курчатовский институт» был инициатором национальной программы «Развитие управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий на период 2019–2025 гг. и на перспективу до 2035 г.». Расскажите об этом подробнее.

— Это очень важный момент. Инициатором создания этой программы стал М.В. Ковальчук. Ведь все страны, обладающие такого рода технологиями, имеют национальные программы, теперь и у нашей страны тоже есть национальная программа по развитию управляемого термоядерного синтеза. Если брать интересные задачи, то это, безусловно, развитие гибридных систем, которое заложено в программе как отдельный проект. Курчатовский институт — научный руководитель программы, но участвовать в ней будут институты и производства из различных уголков России, словом, все, кто имеет опыт в области термоядерных исследований.

Помимо гибридных систем, в рамках программы предусмотрено развитие новых технологий, используемых в установках для исследования термоядерного синтеза. Это, в частности, сверхпроводимость. Кстати, впервые сверхпроводящая электромагнитная система была продемонстрирована в Курчатовском институте на токамаке Т-7 — речь идет о первой сверхпроводящей установке в мире. Будет развиваться также материаловедение. Кроме того, одно из самых основных наших перспективных направлений, параллельное термоядерному синтезу, — развитие плазменных двигателей. Это принципиально новый тип двигателей, благодаря которым станут возможными межпланетные и даже межгалактические перелеты. ■

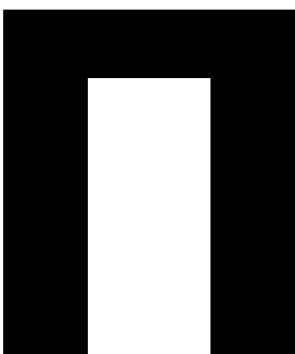
Беседовала Янина Хужина

**БОЛЬШОЙ
ЗАВОД ОИ
ПО
ПРОИЗВОДСТВУ
НАУКИ**

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера спустя десятилетия работы на переднем крае науки продолжает разрабатывать источники синхротронного излучения, коллайдеры и другие установки не только для российской науки, но и в рамках международных проектов.



Академик П.В. Логачев



прямо сейчас ученые нацелены на новый рекорд — создать источник с уникальными параметрами. Каким будет Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ) — универсальная установка класса «мегасайенс» для науки и технологий будущего? Об этом и многом другом рассказывает академик **Павел Владимирович Логачев**, директор Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

— **В чем уникальность Сибирского кольцевого источника фотонов?**

— На момент запуска он станет лучшим синхротроном с передовыми параметрами. Мы нацелены на мировой рекорд в этом направлении.

— **А кто был предыдущим рекордсменом?**

— Сегодня лучшей машиной считается MAX IV — источник синхротронного излучения в Швеции вблизи города Лунда. Ускорительный комплекс Европейского центра синхротронных исследований в Гренобле также стремится достичь параметров, близких к четвертому поколению. СКИФ должен буквально перешагнуть существующие характеристики.

— **Догнать и перегнать одновременно?**

— В данном случае мы никого не догоняем, а работаем в соответствии с опытом наших коллег. Ведь в создании всех упомянутых источников участвовали отечественные специалисты.

— **То есть ИЯФ известен во всем мире как организация, предлагающая лучшие технологические решения?**

— Верно. Наиболее яркий пример — запуск источника синхротронного излучения NSLS-II (*National Synchrotron Light Source*) в 2014 г., на тот

момент лучшего и в мире, и в США, построенного в Брукхейвенской национальной лаборатории. В рамках проекта специалисты ИЯФ сделали бустерный синхротрон под ключ. Мы впервые взялись за почти 200-метровую машину. Вся работа опиралась на наши разработки и накопленный опыт, который получили сотрудники института при создании коллайдеров и других высокотехнологичных приборов.

Интересно и то, что до запуска NSLS-II уже работали подобные установки, которые, однако, не вышли на параметры третьего поколения: французская SOLEIL, испанская ALBA и австралийский «Бумеранг». Система запуска пучка из подготовительного инжекционного комплекса была достаточно стабильна, но пучок постоянно дрожал. Упомянутые ускорители работают в режиме непрерывной инжекции. Это значит, что при постоянных возмущениях необходимо филигранно точно сжать сгусток на равновесную орбиту, чтобы пользователи не видели этих колебаний или смещения источника рентгеновского излучения. Благодаря проделанной работе сотрудников Института ядерной физики синхротрон NSLS-II в Брукхейвенской национальной

лаборатории запустился сразу на проектных параметрах, которые были запланированы. Похожее решение для инжекционного комплекса мы применим на СКИФ. То есть разработка, которая сделана нами для США, сыграет позитивную роль для отечественной установки.

— Вы говорите о параметрах и четвертом поколении. О каких характеристиках идет речь?

— Фактически речь идет о размере рентгеновского источника. Всем известно, что чем меньше источник света в фонарике, тем более ярким и дальноточным будет луч. То же самое характерно для рентгеновских источников и синхротронного излучения. Научное сообщество бьется за минимальный размер излучающей области. И четвертое поколение как раз предполагает, что ее размер должен быть меньше длины волны излучения. В этом случае мы получаем уникальное свойство когерентности. Дело в том, что все электроны в пучке расположены случайно, значит, и излучает каждый конкретный электрон. Но если добиться правильного размера пучка, то излучение станет когерентным и будет обладать свойством лазера.

Когда размер источника существенно меньше длины волны, то даже случайно излучающие электроны получают привязку по фазе, излучая практически одновременно и двигаясь по единой траектории. В таком случае можно проводить тонкие измерения и видеть то, что недоступно при спонтанном излучении. Другое важное свойство — это колоссальная яркость при огромной интенсивности пучка.

Есть и другие тонкости, которые связаны с развитием современных технологий в области ускорительной техники. В последние десятилетия серьезно шагнули вперед — и ИЯФ здесь абсолютный мировой лидер — так называемые устройства для генерации синхротронного излучения. Во-первых, они давно стали сверхпроводящими. Во-вторых, при работе с ними не нужен жидкий гелий. Пользователю не нужно покупать его на рынке, собирать в отдельный резервуар, сдавать обратно и т.д., что сильно бьет по бюджету. Как оказалось, можно обойтись малым объемом гелия, который замкнут внутри системы. Остается просто включить тумблер сетевого питания — и уже через сутки магнит выйдет в сверхпроводящее состояние.

— Когда это удалось реализовать?

— Около пяти лет назад. Кроме нас этого никто в мире делать не умеет. Здесь мы в хорошем смысле считаемся монополистами.

— Есть ли интерес к этой технологии?

— Только у нас и покупают. Научные группы готовы ждать несколько лет, чтобы получить наше устройство и не платить большие деньги за эксплуатацию.

— Поговорим о задачах проекта СКИФ. Каковы ключевые направления исследований, которые будут на нем проводиться?

— Я бы разделил задачи на две части. Первая направлена на обеспечение отлаженных методик, использующихся на всех синхротронах, а их в мире около 50. Синхротрон — это рабочий инструмент, необходимый практически во всех естественных науках, начиная с физики и заканчивая медицинской и археологий.

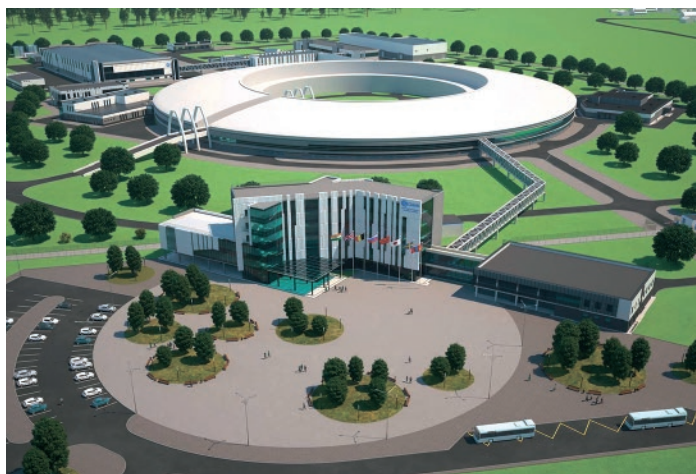
Вторая часть направлена на освоение технологий четвертого поколения. Надо понимать, что таких источников с очень малым размером не существует. С четвертым поколением пока никто работать не умеет, потому что его не было ранее. Мы попытаемся приблизиться к этим уникальным свойствам пучка, которые еще надо научиться использовать. Перспективы большие, но никто пока с этим не работал.

— Придется учиться на ходу?

— Конечно, ведь это тоже некий вызов для исследователей. У них появляется инструмент, которого никогда раньше не было. Для этого в том числе и создается Сибирский кольцевой источник фотонов. Но для нашего института СКИФ — скорее побочный продукт. Для нас работа над созданием ускорителя — в каком-то смысле отвлечение от наших исследований и главных направлений. Однако мы осознаем, что это нужно всему научному сообществу, поэтому не останавливаемся ни на минуту. Эдакая научная благотворительность.

— А что СКИФ может дать исследователю? Экспериментальное доказательство теорий или гипотез?

— Речь идет не о теориях, а скорее о моделях, которые могут превратиться в более системные представления за счет применения этого инструмента. Фактически это дает возможность очень точно и детально исследовать атомную структуру



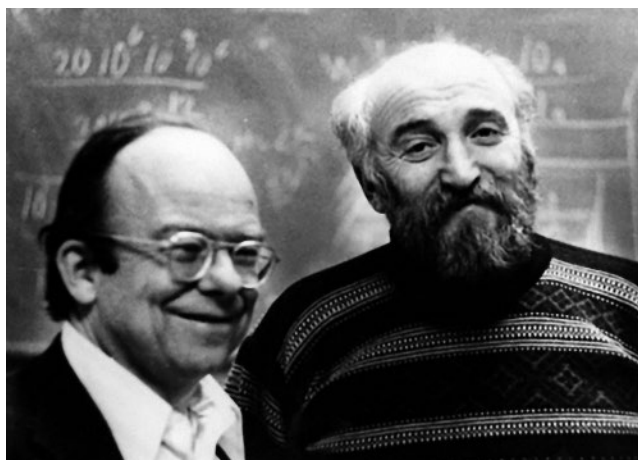
Визуализация: общий вид на синхротрон СКИФ, подготовленный Центральным проектно-технологическим институтом

вещества любых молекул. Это касается и биологических объектов, и вирусов, и генетического материала в клетке и т.д. СКИФ обеспечит исследования, связанные с конструированием, которые ведутся в рамках синтетической биологии. Ученые смогут детально разобраться в том, как устроены клетки и молекулы, их связи, каковы межатомные расстояния.

Другое важное направление — материаловедение и создание новых материалов. СКИФ позволит исследовать, как материалы работают при реальных нагрузках, почему они разрушаются, как предотвратить это разрушение, как получить нужные свойства материалов в тех или иных условиях. Ученые смогут видеть, как расположены атомы, как они меняют свое положение исходя из давления, температуры, нагрузки, как и почему происходит разрушение и т.д. То, что раньше было недоступно, сейчас можно посмотреть впрямую, и это дает новые знания.

И, конечно, фармкомпании будут очень активно использовать синхротрон для более качественного и быстрого продвижения на рынок новых препаратов, включая такие сложные в создании и производстве, как средства адресной доставки в онкологии. Здесь же создание различных лекарственных форм, которые используют возможности иммунной системы и опираются на ее работу. Все эти направления чрезвычайно важны.

Открываются возможности в области исследования быстропротекающих процессов, которые применяются в том числе и в оборонной промышленности. До этого у нас не было мощных источников и возможностей обеспечивать развитие военной науки в этом направлении. После запуска СКИФ они появятся.



Г.И. Будкер (справа), основатель и первый директор Института ядерной физики Сибирского отделения АН СССР, и **Вольфганг Панофский** (слева), основатель Стэнфордского центра линейных ускорителей (в настоящее время Национальная ускорительная лаборатория SLAC)

— Во всем мире сегодня сделали ставку на крупные проекты класса «мегасайенс». Почему?

— На самом деле ставка эта сделана давно, начиная с 1950-х гг. Именно в этот период были созданы крупнейшие объекты инфраструктуры по исследованию фундаментальных свойств материи. Подобные установки строились и в США, в Национальной ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми, Брукхейвенской национальной лаборатории, Аргоннской национальной лаборатории, и у нас в России, в Сарове и Снежинске. Нельзя забывать про Дубну, где установки класса «мегасайенс» создавались изначально.

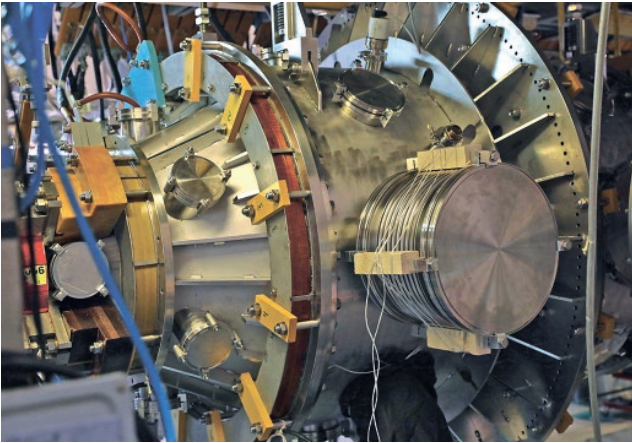
Напомню, что Институт ядерной физики основан в 1958 г. Спустя четыре года он переехал из Москвы, из Курчатовского института сюда на площадку Академгородка. И уже здесь в 1960-е гг. появились первые мегаустановки, в том числе первый в мире электрон-позитронный коллайдер, который выдал хорошую производительность и результаты по физике. С 1968 г. и по сей день в институте всегда работал хотя бы один коллайдер. В мире нет такой лаборатории, где на протяжении стольких лет сохранялся бы столь длительный, непрерывный процесс разработки, создания, эксплуатации и получения результатов с установок на встречных пучках — коллайдеров.

На наших ускорителях сталкиваются пучки электронов и позитронов, материя и антиматерия. В CERN протоны сталкиваются с протонами в Большом адронном коллайдере. Хотя до него в этом же 27-километровом тоннеле работал электрон-позитронный коллайдер LEP. С помощью экспериментов в синхротронном центре DESY в Германии были открыты кварки, исследована структура протона и нейтрона. Поэтому создание установок класса «мегасайенс» нельзя назвать тенденцией последнего времени. Это закономерное развитие, которое идет по нарастающей.

— Как правило, подобные проекты создаются на базе консорциумов институтов либо целых стран, как, например, в Дубне. Почему приходится объединять усилия?

— На самом деле нет никаких юридических объединений. Но все физики в мире всегда работают вместе, потому что наука и законы природы не зависят от страны, от точки в пространстве и даже от точки во времени. Цели и задачи, менталитет ученых, в частности физиков, из разных стран — одинаковые. Познание природы, некий прилив радости от того, что видишь красоту природы, которую раньше не видел, что можешь донести эту красоту, знания до людей — это и есть главная мотивация ученого. И так было всегда: ученые друг друга понимали и поддерживали.

В качестве примера можно привести очень глубокую дружбу основателя нашего института Г.И. Будкера и Вольфганга Панофского — основателя



Установка ГОЛ-NB — ловушка для удержания высокотемпературной плазмы

Стэнфордского центра линейных ускорителей (в настоящее время Национальная ускорительная лаборатория SLAC). Они были друзьями и во всем помогали друг другу. И мы до сих пор чувствуем помощь и поддержку наших коллег из SLAC.

Речь идет о естественном желании творческих людей работать вместе. Каждый из них понимает: когда в одном оркестре, условно говоря, играет очень много ярких, красивых, профессиональных музыкантов, получается удивительная мелодия, которую в одиночку не сыграть. Это характерно и для науки. Поэтому всегда были и будут подобные виды сотрудничества, а в какой форме, зависит от конкретной политической обстановки, различных законодательных, юридических ограничений и т.д. Но мировое научное сообщество едино. Все друг друга знают, поддерживают и очень дорожат мнением своих коллег из других стран.

— **Какие ключевые этапы истории развития института вы бы выделили?**

— Каждый этап по-своему значим. Но я бы выделил несколько главных. Основатель института академик Г.И. Будкер привнес два очень сильных и глубоких изобретения (помимо многочисленных открытий из области физики), связанных с организацией института, которые продолжают развиваться по сей день.

Первое изобретение — это круглый стол, который появился здесь сразу после рождения института. Сначала он был небольшим, затем увеличивался и вырос до того размера, который вы видели. Что такое круглый стол? Это некая технология, направленная на поддержание и развитие

в институте творческой и свободной научной атмосферы вне зависимости от конкретных личностей руководителей. С точки зрения управления этот механизм позволяет совместить центр принятия решения с центром максимальной компетенции по данному вопросу. В институте решения всегда принимают наиболее грамотные в данном вопросе и квалифицированные специалисты, а не руководители и начальники. Задача последних — создать все условия, чтобы в институте были такие специалисты, чтобы они развивались и росли, выходили на мировой уровень. И, конечно, таким сотрудникам не нужно мешать, а, наоборот, необходимо всячески помогать работать. Именно поэтому за счет технологии круглого стола институтом сегодня руководят около 200 человек. Помимо большого числа выдающихся физиков, это и аспиранты, и технологи, и даже рабочие. Это наши службы, максимально интегрированные в коллектив института, который работает на горизонтальных связях. Люди знают, кто чего стоит, кто что умеет, и они сразу обращаются к тому человеку, кто сделает дело и найдет наиболее правильное и реалистичное решение конкретной задачи.

Круглый стол позволяет определять людей, которые могут эффективно управлять институтом. Методом проб, а иногда и ошибок каждый должен пройти некую лестницу успеха, доказывая на каждой ступени, что он смог решить задачу.

Сотрудники собираются вместе за круглым столом в неформальной обстановке и решают, кому поручить тот или иной проект, исходя из способностей и профессиональных навыков. На каждом из этапов человек может рассчитывать на помощь и поддержку коллег. После этого выбранный сотрудник выполняет функцию директора,



Прототип высоковольтного инжектора, предназначенного для нагрева плазмы в крупных термоядерных установках

руководителя по своему направлению. Он определяет все шаги для дальнейшей реализации. Важно, что человек, взявшийся за дело, уважает коллег, которые ему это поручили, и для него самая сильная мотивация — их доверие. Мы называем это механизмом репутационной ответственности. Она гораздо сильнее любых денег, она вообще не покупается и не продается. И первостепенный механизм позитивного развития любого настоящего научного сообщества — научная репутация. Это главный капитал, который есть у ученых.

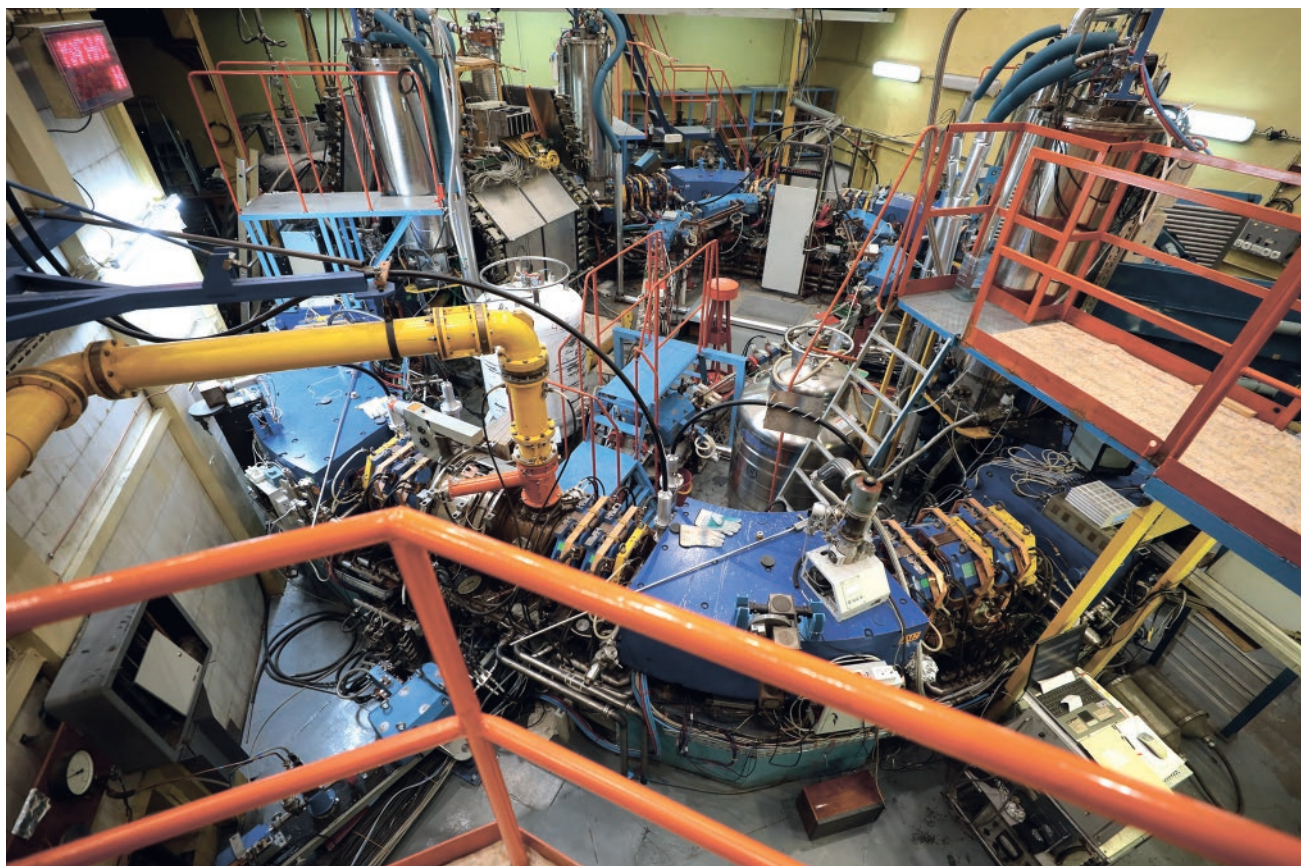
Второе изобретение Г.И. Будкера — наше экспериментальное производство. Будкер понимал, что невозможно на обычных заводах делать то, чего никто никогда в мире не делал. Это должен быть специальный завод, где должны работать творческие люди на основе тех же принципов, что и научное сообщество института. Неслучайно за нашим круглым столом собираются не только физики, инженеры, но и экономисты, бухгалтеры, инженерные службы, сотрудники производства, рабочие, технологи. Каждый из нас работает в едином коллективе. Научные сотрудники напрямую работают со слесарями, станочниками, мастерами, технологами на нашем экспериментальном производстве. Они знают, где находятся их детали, на какой стадии, смотрят, что получается,

и быстро принимают решение, если необходимо что-то изменить. Только в такой атмосфере, в таком режиме можно создавать абсолютно нестандартные вещи. Как сказал мой хороший знакомый из Сарова, нашей дружественной лаборатории РФЯЦ ВНИИЭФ: «Я понял, что такое ИЯФ. Это большой завод по производству науки».

— Какие направления развиваются в институте сегодня?

— Сегодня мы развиваем четыре крупных направления. Первое связано с источниками синхротронного излучения и лазерами на свободных электронах. Дело в том, что исторически ИЯФ был одним из пионеров применения синхротронного излучения в мире. К нам ездили американцы, европейцы, многому у нас учились, а мы учились у них. В то время мы работали с лучшими параметрами, соответственно, излучение имело уникальные характеристики. Благодаря накопленному опыту мы сохраняем лидирующие позиции и сегодня.

Второе направление посвящено физике элементарных частиц. Это та часть, которая лежит в основе понимания нашего мира, того, как зародилась наша Вселенная. По сути, космология и физика элементарных частиц — это одна наука. Сегодня они настолько тесно связаны между



Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000

собой, что одна без другой существовать не может. Две области науки о структуре и природе нашего пространства, физического мира — то, что сегодня называют Стандартной моделью. Стандартная модель, самое совершенное и глубокое знание человека о природе, на 60% основана на данных, которые были получены именно на коллайдерах — установках на встречных пучках. С помощью этих приборов были открыты кварки, электрослабое взаимодействие, изучены многие свойства частиц и материи, в том числе предсказательные, был открыт бозон Хиггса.

Это чрезвычайно мощное направление, и нужно создавать больше инструментов, которые будут и дальше развивать науку. Даже сегодня к Стандартной модели много вопросов. Это некая искусственная конструкция, и в ней пока множество белых пятен. Мы до сих пор не понимаем ее основы. Современные ученые работают с широким кругом неизвестного, и он гораздо больше, чем область наших знаний. Конечно, надо продвигаться дальше, осваивать неизведанное. Для этого и создаются новые ускорительные системы. Новые эксперименты позволят лучше понять наш сложный мир, который описывается сегодня Стандартной моделью. Наверняка он еще хитрее, сложнее, и с этим надо разбираться.

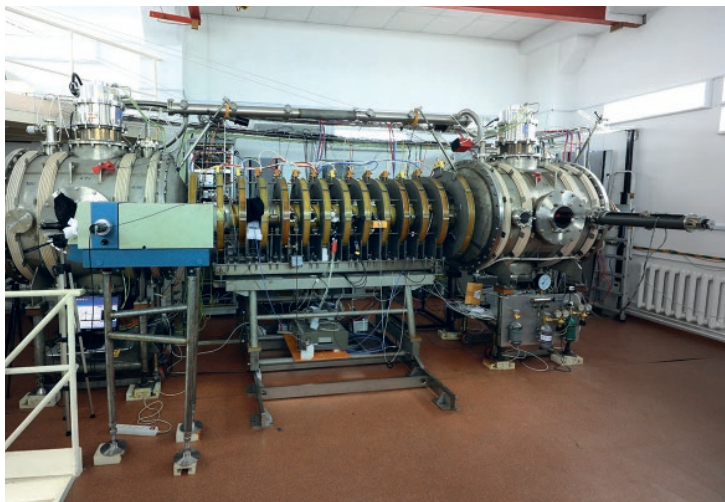
Третье направление — физика плазмы и управляемого термоядерного синтеза. Это решение энергетической проблемы за счет использования термоядерной энергетики. Мы точно к этому придем, и мы уже находимся на переднем крае мировой науки, участвуем в самых амбициозных мировых проектах, посвященных термоядерному синтезу. Без наших знаний и уникальных приборов не будут работать ни американский, ни европейский проекты. В каждом из них мы принимаем ключевое участие.

Четвертое направление посвящено традиционному развитию ускорительной техники.

Каждое из направлений значимо и развивается на стыке дисциплин. Внутри института нет перегородок между лабораториями. Физики из разных лабораторий могут собраться и поработать над интересной идеей или задачей, которую они могут решить вместе.

— Насколько я знаю, вы как раз занимаетесь ускорительной техникой. Почему вы выбрали для себя это направление?

— Когда я был еще мальчишкой, ускорительная техника была на пике популярности. Уже тогда работали большие ускорительные комплексы в Дубне, создавался и работал крупный центр в Протвине. Это было у всех на слуху, престижно, интересно и совершенно непонятно.



Экспериментальная установка СМОЛА (Спиральная магнитная открытая ловушка)

Впервые я попал в ИЯФ, когда мне было 14 лет. Это было в январе 1980 г., 41 год назад. Мне нравилась физика, и я делал успехи. Вначале меня пригласили в зимнюю школу при Новосибирском государственном университете. При этом в ИЯФ в рамках зимней школы проводилась олимпиада, по результатам которой приглашали в летнюю школу, а потом в физико-математическую школу. Вначале я попал в летнюю школу ИЯФ, а потом два года проучился в ФМШ. Моим учителем по физике был сотрудник Института ядерной физики, один из выдающихся ученых, который и сегодня создает лучшие в мире сверхпроводящие устройства для генерации синхротронного излучения, Н.А. Мезенцев. Уже тогда на семинаре я почувствовал эту ияфовскую атмосферу. Николай Александрович общался с нами как с коллегами. Это всегда очень подкупает. Поэтому я поступил в НГУ на физфак, а затем пришел работать в ИЯФ.

— Над чем вы работаете сегодня? Остается ли место для науки?

— Конечно, полноценной возможности заниматься наукой сейчас нет. Но в 2025 г., отработав свой срок, я передам полномочия достойному человеку из института. После этого я продолжу заниматься наукой, привлекать других талантливых ребят, а это самое главное. Продолжает работу физико-математическая школа, развивается физфак Новосибирского государственного университета, по моему мнению, лучший в стране, ведь в шаговой доступности сконцентрированы сильные физические институты. В Москве такого нет. В Новосибирске работают потрясающие преподаватели мирового уровня, которые семь-восемь лет учат студентов, а потом бок о бок с ними же и работают.

Беседовала Анастасия Пензина



ХРУСТА- ЛИК ГЛАЗА — ЧУДО ПРИРОДЫ

Константин Муранов
и Михаил Островский

— Он еще сказал, что наука когда-нибудь
откроет основную тайну жизни, — вмешался
бармен, потом почесал затылок и нахмурился: —
Что-то я читал на днях в газете, будто нашли,
в чем секрет, вы не помните?
— Не помню, — пробормотал я.
— А я читала, — сказала Сандра, — позавчера,
что ли.
— Ну, и в чем же тайна жизни? — спросил я.
— Забыла, — сказала Сандра.
— Протеин, — заявил бармен, — чего-то они там
нашли в этом самом протеине.

Курт Воннегут. Колыбель для кошки

ОБ АВТОРАХ

Константин Олегович Муранов — доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физико-химических основ регуляции биологических систем Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН. Сфера научных интересов — белок-белковые взаимодействия в хрусталике глаза, этиология и патогенез катаракты.



Михаил Аркадьевич Островский — создатель и лидер отечественной научной школы молекулярной физиологии и патологии зрения, основоположник научного направления фундаментальных исследований молекулярных механизмов зрительной рецепции. Академик, заслуженный профессор МГУ им. М.В. Ломоносова, главный научный сотрудник Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, заведующий кафедрой молекулярной физиологии биологического факультета МГУ, президент Физиологического общества им. И.П. Павлова.



Хрусталик глаза — поистине чудо природы. Мало того что он прозрачен, и притом почти всю жизнь, он еще и живая фокусирующая линза, обеспечивающая резкость изображения на сетчатке, а кроме того, это светофильтр, отсекающий от сетчатки опасный для нее ультрафиолет.

Довольно давно стало понятно, почему хрусталик прозрачен, но до сих пор неясно, как эту прозрачность сохранить, не допустить его помутнения — то есть развития катаракты. А катаракта — самое распространенное глазное заболевание в мире. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), причиной слепоты почти 40% людей в возрасте 50 лет и старше становится именно катаракта (WHO, 2012, Lancet Glob. Health, 2020).

Из всех видов катаракт «старческая» — настоящий бич стареющего человечества. Конечно, современная высокотехнологичная, изощренная хирургия позволяет удалить

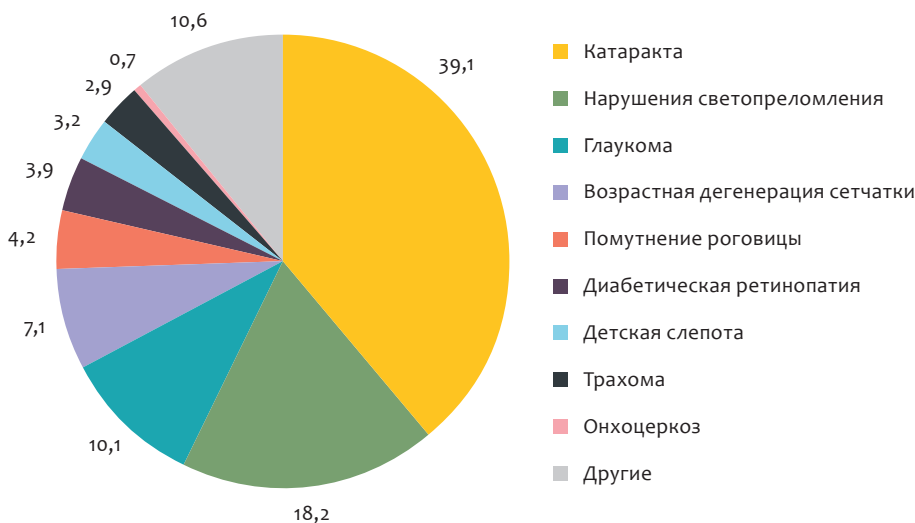
помутневший хрусталик и заменить его на новый, искусственный. Но само хирургическое вмешательство может быть небезобидным. Заменить в глазу хрусталик — это совсем не то же самое, что сменить объектив в фотоаппарате. Поэтому, естественно, лучше предотвратить катаракту, чем ее оперировать. А для этого нужно хорошо понимать, почему хрусталик прозрачен, с помощью каких механизмов эта прозрачность поддерживается, почему вдруг он начинает мутнеть. В последнее время на многие из этих вопросов получены вполне вразумительные ответы.

ИТАК, ПОЧЕМУ ХРУСТАЛИК ПРОЗРАЧНЫЙ?



Прав был воннегутовский бармен: «Чего-то они там нашли в этом самом протеине». Хрусталик глаза сделан из протеина, то есть из белка.

А белок обладает удивительными свойствами. Его раствор при низкой концентрации, например 3 мг в миллилитре, абсолютно прозрачен. Если постепенно увеличивать концентрацию белка, то раствор начнет мутнеть. Это понятно. Но если концентрацию белка довести до 300 мг в миллилитре, то раствор этот снова станет прозрачен. И вот это чудо! Получается, что раствор белка прозрачен и при маленькой концентрации 3 мг в миллилитре, и при концентрации в 100 раз большей. Коллоидная химия (а раствор



Структура заболеваний глаза в мире (ВОЗ, 2012)

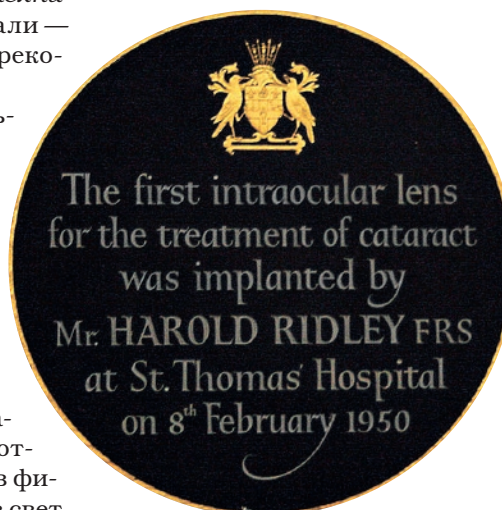
белка — это коллоидный раствор) дает этому довольно простое объяснение. Вследствие броуновского движения молекулы белка перемещаются, образуя зоны с повышенной и пониженной концентрацией. Свет рассеивается, проходя через такие зоны, вот он — коллоидный раствор! Свет рассеивается по-разному, проходя через растворы белка разной концентрации. При увеличении концентрации расстояние между молекулами белка будет уменьшаться и в конце концов сократится настолько, что раствор белка приобретет структуру, подобную кристаллу. А кристалл, как известно, прозрачен. Именно поэтому, согласно законам коллоидной химии, хрусталик прозрачен, ведь концентрация белка в нем неимоверно высока — 450 мг в миллилитре у человека и 900 мг в миллилитре у мыши!

Прозрачен-то прозрачен, но не для ультрафиолета, а в пожилом возрасте и не для фиолетово-синих лучей видимого спектра. Правда, в младенческом и детском возрасте он прозрачен частично для ультрафиолета и фиолетово-синих лучей. В физиологии зрения такая прозрачность получила название «ультрафиолетовое окно». А ультрафиолет для сетчатки губителен. Опасность эта для детей особенно обострилась в связи с широким распространением светодиодного освещения и необдуманном увлечением им. Свет «холодных» фиолетово-синих светодиодов, проникая через «ультрафиолетовое окно» детского хрусталика, способен вызвать непредсказуемые и самые неблагоприятные последствия для зрения. О недопустимости использования «холодного» светодиодного освещения в детских садах и школах, особенно в младших классах, еще лет десять тому назад мы забили тревогу (см.: *Зак П.П., Островский М.А. Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков // Светотехника, № 3, 2012*). Судя по всему, нас услышали — и такое освещение для детей сейчас не рекомендуется.

У взрослого человека средних лет «ультрафиолетового окна» уже нет, и его хрусталик, задерживая ультрафиолет, свободно пропускает к сетчатке все лучи видимого спектра. Однако ближе к пожилому возрасту нормальный здоровый хрусталик, продолжая оставаться прозрачным, начинает желтеть. И это для сетчатки величайшее благо. Ибо к пожилому и старческому возрасту в сетчатке и лежащем за ней так называемом пигментном эпителии накапливаются вещества, поглощающие свет как раз в фиолетово-синей области спектра. Поглотив свет,

эти вещества образуют активные токсичные формы кислорода. Иными словами, они фототоксичны. Желтеющий с возрастом хрусталик все больше задерживает фиолетово-синие лучи, защищая сетчатку от опасности фотоповреждения.

С этим естественным физиологическим феноменом пожелтения хрусталика связана важная для нас история создания желтых искусственных хрусталиков — интраокулярных линз. Несомненно, изобретение интраокулярных линз стало революцией в офтальмологии. Их изобретатель, английский офтальмолог Гарольд Ридли претерпел немало трудностей, прежде чем офтальмологический мир их признал. Эта история интересна и поучительна. Как вспоминал сам Ридли, где-то в 1947 г. в конце утомительного операционного дня его студент Стив Пэрри сказал: «Жаль, что нельзя заменить мутный хрусталик прозрачной линзой». Эти простые слова стали тем самым Ньютоновым яблоком, упавшим на голову Ридли. Действительно, заменить хрусталик пытались начиная с древних времен. Успех пришел к Гарольду Ридли, который разработал такую линзу и в конце 1949 г. имплантировал первому пациенту. Ридли описывает как один из самых ярких моментов своей жизни, когда пациент, еще находясь на операционном столе, воскликнул: «Джентльмены, я абсолютно четко вижу ваши лица!». Но судьба Ридли оказалась нелегкой. Его доклад на Оксфордском офтальмологическом конгрессе в июле 1951 г. вызвал шквал критики. Ожидаемый триумф обернулся трагедией. Ридли был вынужден несколько лет лечиться от тяжелого нервного расстройства. Потребовалось более 20 лет, иными словами, смена поколения, чтобы операция по замене хрусталика была признана во всем мире.

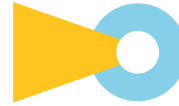


Памятная табличка, установленная на стене Больницы Св. Томаса в Лондоне в честь первой замены катарактального хрусталика на искусственный

В связи с первой заменой катарактального хрусталика на искусственный на стене лондонской Больницы Св. Томаса установлена памятная табличка.

Находка, обеспечившая Гарольду Ридли успех, состояла в выборе материала для линзы. Им стал полиметилметакрилат, известный всем как плексиглас. Его высокоочищенный вариант для линз — перспекс (*Perspex*) — успешно зарекомендовал себя во всем мире и широко используется на практике до наших дней. Но, как вскоре выяснилось, у перспекса был существенный недостаток — он был прозрачен для ультрафиолета. Возникли осложнения, поэтому в перспекс ввели поглотитель ультрафиолета. Теперь ультрафиолет до сетчатки не доходил, но случаи ее повреждения все равно сохранялись. Это указывало на то, что действует еще какой-то повреждающий фактор. Им оказались те самые фототоксические вещества, которые накапливаются в сетчатке, поглощают свет в фиолетово-синей области спектра и образуют активные формы кислорода. Следовательно, искусственный хрусталик, особенно предназначенный для пожилых людей, должен делать то же самое, что и естественный хрусталик, — отсекают от сетчатки фиолетово-синие лучи. Иными словами, интраокулярная линза должна быть желтой, как и естественный хрусталик примерно 50-летнего человека. Исходя из этого именно такую линзу мы, физиологи (один из авторов этой статьи М.А. Островский и П.П. Зак), разработали и затем предложили офтальмологам в МНТК «Микрохирургия глаза» С.Н. Федорову и Л.Ф. Линнику. К счастью, они сразу согласились с целесообразностью использования желтых интраокулярных линз, надежно защищающих сетчатку от опасности светового повреждения. Эти линзы под названием «Спектр» стали изготавливаться и широко применяться во всех клиниках МНТК «Микрохирургия глаза». Затем их стали имплантировать в глаз взамен катарактального хрусталика во многих других офтальмологических клиниках страны. За эту работу нам даже присудили Премию Правительства РФ в области науки и техники за 2005 г. с формулировкой «За научное обоснование, разработку и внедрение в офтальмологическую практику фотопротекторных искусственных хрусталиков с естественной спектральной характеристикой». Только через пару десятков лет после нас американская корпорация *Alcon* стала выпускать интраокулярные линзы, но теперь уже не жесткие из полиметилметакрилата, а мягкие, однако с точно такими же спектральными

характеристиками, как и у наших линз «Спектр». Теперь алконовские желтые интраокулярные линзы распространились по всему офтальмологическому миру.



КАК ПРОЗРАЧНОСТЬ ХРУСТАЛИКА ПОДДЕРЖИВАЕТСЯ И ПОЧЕМУ ОН МУТНЕЕТ?

Хрусталик глаза — линза живая, из белка, не из стекла! Белок — недолговечный материал, именно поэтому в организме происходит постоянный, активный, сложный процесс обновления белков: распад на исходные аминокислоты старых и биосинтез новых. Обновляются не только белки, но и сами клетки, а иногда даже части клеток. В глазу, например, постоянно обновляется светочувствительный наружный сегмент зрительной клетки — палочки и колбочки. Клетки крови и многих органов обновляются постоянно. В хрусталике не так! В хрусталике белки-кристаллины не обновляются.

Возраст белков в центре хрусталика, в его ядерной части практически равен возрасту человека. Вокруг ядра, в так называемой корковой части хрусталика белки тоже не обновляются. Но они появились позже, уже после рождения, в ходе развития организма, то есть они немного моложе белков ядра. В любом случае, по всем законам белковой химии белки не живут так долго, как сам человек, они портятся. А порча белков в хрусталике приводит к потере его прозрачности, то есть к катаракте. Но в хрусталике, на самом деле, белки живут долго, не портятся до очень и очень преклонных лет. Иначе говоря, хрусталик, как правило, остается прозрачным до глубокой старости. Причина тому — сформировавшаяся в ходе эволюции довольно мощная система защиты от помутнения, система сохранения принципиально важного для зрения свойства хрусталика. Свойство это — быть прозрачным.

Как выяснилось сравнительно недавно (и продолжает выясняться до сих пор), ключевую роль в системе защиты прозрачности играет один из белков самого хрусталика. Дело в том, что белков-кристаллинов в хрусталике — несколько видов. Основные — это альфа-, бета- и гамма-кристаллины. Причем бета- и гамма-кристаллины очень легко слипаются, агрегируют. Если это случится, прозрачность исчезнет, хрусталик помутнеет. Альфа-кристаллин поддерживает прозрачность, не дает бета- и гамма-кристаллинам

слипаться, образовывать агрегаты — комки. Но стоит альфа-кристаллину чуть-чуть испортиться, и он теряет способность удерживать бета- и гамма-кристаллины от агрегации. В результате хрусталик начинает мутнеть. Таков механизм образования катаракты.

Это было продемонстрировано нами в эксперименте на модели ультрафиолетовой катаракты. В опытах *in vitro* при облучении ультрафиолетом бета- и гамма-кристаллины они агрегируют. Добавление к ним альфа-кристаллина естественным образом замедляет их агрегацию, то есть защищает от ультрафиолета. Мы, как и многие другие исследователи, пытаемся понять, как именно альфа-кристаллин это делает.

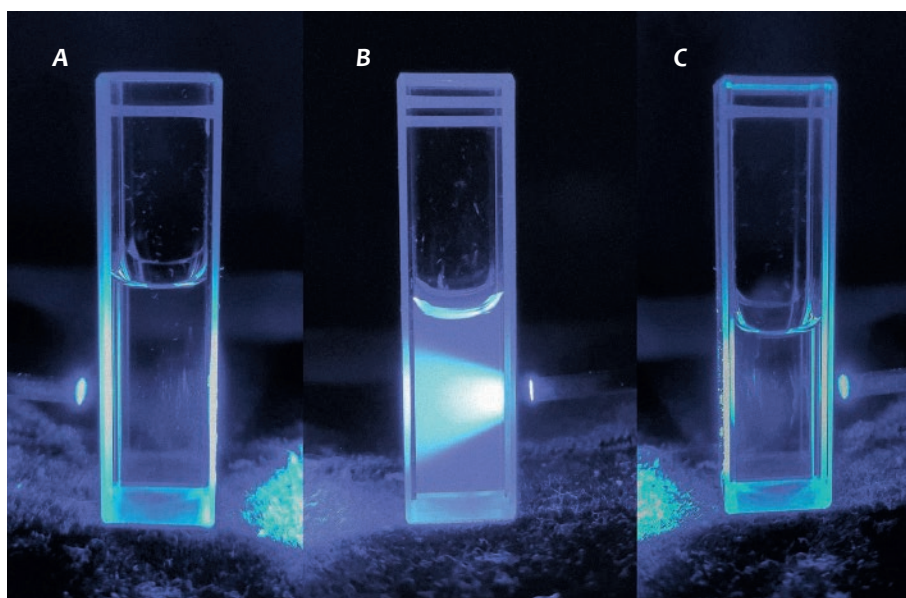
Альфа-кристаллин принадлежит к классу так называемых шаперонных белков. Шапероны способны восстанавливать нормальную (нативную) структуру поврежденного белка, иными словами, «чинить» поврежденные белки. Чтобы понять, как именно они «чинят», прежде всего, нужно знать, как они устроены, то есть их трехмерную структуру. За прошедшие почти 70 лет со дня открытия альфа-кристаллина, а открыли его советские биохимики В.Н. Орехович, К.Ф. Фифарова и М.П. Черников в 1954 г., трехмерную структуру альфа-кристаллина выяснить не удалось. Причина в том, что альфа-кристаллин многолик: размеры его могут варьировать от 5 до 30 нм. Альфа-кристаллин не находится в стабильном состоянии, он все время меняется. Его молекула состоит из многих «блоков» — субъединиц, отдельные молекулы постоянно обмениваются этими блоками. На основании результатов целого комплекса физико-химических исследований в сочетании с электронной микроскопией нам в содружестве с С.Н. Рязанцевым из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе удалось построить трехмерную модель альфа-кристаллина. На основании результатов целого комплекса физико-химических исследований нам удалось построить трехмерную модель альфа-кристаллина. Согласно этой модели, молекула альфа-кристаллина имеет внутри себя нечто похожее на полость. В эту полость входят поврежденные, в нашем случае ультрафиолетом, молекулы

бета- и гамма-кристаллинов. Внутри полости повреждения «лечатся», восстанавливается исходная, нативная структура белка. В результате «лечения» молекулы бета- и гамма-кристаллинов не слипаются — раствор остается прозрачным, а если и мутнеет, то гораздо медленнее. Таков, по нашему представлению, механизм защитного действия альфа-кристаллина как шаперона, сохраняющего прозрачность хрусталика.

Однако с возрастом падают как защитная активность альфа-кристаллина, так и его количество в хрусталике. Поэтому он уже не способен эффективно удерживать бета- и гамма-кристаллины от агрегации. Такова причина возникновения и развития старческой катаракты.

Помимо альфа-кристаллина, в систему защиты прозрачности хрусталика входят природные антиоксиданты и антиоксидантные ферменты. Дело в том, что активные формы кислорода, атакуя молекулу белка, ее повреждают. К счастью, кислорода в хрусталике практически нет. Но при воздействии различных катарактогенных факторов, в том числе ультрафиолета, кислород достигает белков хрусталика и его активные формы портят белки — окисляют. В результате такой порчи хрусталик мутнеет. Поэтому антиоксиданты и антиоксидантные ферменты самого хрусталика — важнейшая линия защиты от помутнения.

В принципе, время сохранения прозрачности хрусталика велико благодаря надежности и мощности его естественной (антиоксиданты,



Рассеяние синего света растворами альфа-кристаллина разной концентрации: А — 3 мг на 1 мл; В — 54 мг на 1 мл; С — 300 мг на 1 мл

альфа-кристаллин) защиты от помутнения. Это время, как правило, превосходит среднее время жизни организма. Животные в дикой природе с катарактой практически не встречаются — они по разным причинам погибают раньше. Но увеличение продолжительности жизни в искусственной, цивилизационной среде приводит к катаракте. От нее страдает не только стареющий царь природы — человек, ей подвержены и домашние животные — долгожители: собаки, кошки, коровы, лошади.

Катаракта возникает не только от старости, известно довольно много ее причин: это и диабет, и различные виды радиации — от ультрафиолета и рентгеновских лучей до тяжелых заряженных частиц галактического излучения и ряда других факторов. Казалось бы, механизм возникновения катаракты должен зависеть от природы повреждающего фактора. Однако это не так. Результаты, полученные нами совместно с офтальмологами Института глазных болезней в Москве и физиками Объединенного института ядерных исследований в Дубне, позволили выдвинуть гипотезу о едином механизме возникновения катаракты. Суть ее в том, что различные катарактогенные факторы (радиация, ультрафиолет, повышенный уровень сахара в крови и др.) повреждают клетки наружного эпителиального слоя хрусталика. В результате в этом слое образуются брешки, через которые внутрь хрусталика начинает проникать кислород. В норме, как мы говорили, кислорода в хрусталике практически нет. В присутствии же кислорода митохондрии, еще сохранившиеся в клетках корковой части хрусталика, начинают вырабатывать активные формы кислорода, которые вызывают окислительное повреждение белков. Окисленные же белки имеют склонность к агрегации. В какой-то момент, когда компенсаторная защитная система не выдерживает, белки начинают денатурировать и агрегировать. Образовавшиеся агрегаты, подобно все нарастающим комкам, превращаются в так

называемые мультиламеллярные тела. Эти тела и сами рассеивают свет, и нарушают кристаллоподобную упаковку белков хрусталика. Хрусталик перестает быть прозрачным — возникает катаракта.



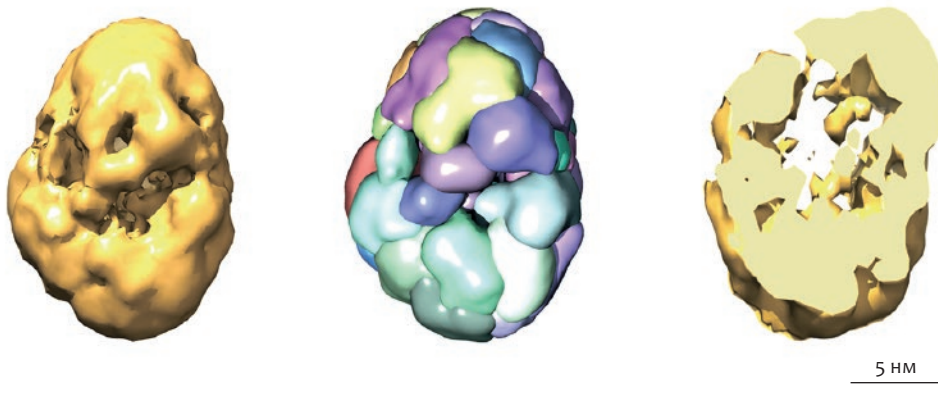
**КАК
ПРЕДОТВРАТИТЬ
ПОМУТНЕНИЕ —
КАТАРАКТУ**

Конечно, хорошо бы и жить долго, и катаракты, во всяком случае старческой, избежать. Увы, несмотря на существование множества видов антикатаральных капель, реально катаракта ими не предотвращается. И сейчас становится понятно почему. Все дело в том, что капать в глаз капли начинают, как правило, когда хрусталик уже стал мутноватым. А это значит, что и кислород уже сделал свой черное дело, и альфа-кристаллин уже не в состоянии предотвратить агрегацию бета- и гамма-кристаллинов. А уж если эти белки-кристаллины схлопнулись, слиплись, образовали агрегаты, мультиламеллярные тела, то вернуть ситуацию вспять невозможно — как невозможно вернуть в сырое, прозрачное состояние белок сваренного куриного яйца.

Что же можно сделать, чтобы задержать, предотвратить помутнение хрусталика?

Во-первых, нужно поймать момент, когда белки хрусталика еще только-только начинают агрегировать. Во-вторых, нужно создать такой антикатаральный препарат, который одновременно и не давал бы белкам окисляться, и, подобно естественному альфа-кристаллину, предотвращал бы агрегацию бета- и гамма-кристаллинов.

Чтобы поймать момент, когда белки хрусталика только-только начинают агрегировать, надо как-то «заглянуть в глаз». А как это сделать? Оказывается, это можно осуществить с помощью современного оптического прибора, который мы условно назвали



Трехмерная модель
молекулы альфа-кристаллина
(S.N. Ryazantsev, N.B. Poliansky,
N.A. Chebotareva,
K.O. Muranov, 3D Structure
of the Native Alpha-Crystallin
from Bovine Eye Lens, *Int. J.
Biol. Macromol.* 117 (2018) 1289)

«Катарактомер». Суть его работы — с помощью анализа некоторых характеристик света, рассеянного хрусталиком, можно «увидеть» как снижение количества молекул альфа-кристаллина, так и появление белковых агрегатов в хрусталике.

Главный принцип работы такого прибора — регистрация света, рассеянного внутри хрусталика. Создано несколько конструкций подобных инструментов. Одна из таких конструкций, разработанная профессором Рифатом Анзари из NASA, уже проходит клинические испытания. Осталось «довести до ума» такие приборы, организовать их производство и внедрение в офтальмологическую практику. Кстати, это тоже не просто, если учитывать консервативность медицинского сообщества. Вспомним историю Гарольда Ридли с интраокулярными линзами. Для их внедрения в повседневную офтальмологическую практику потребовалось несколько десятков лет.

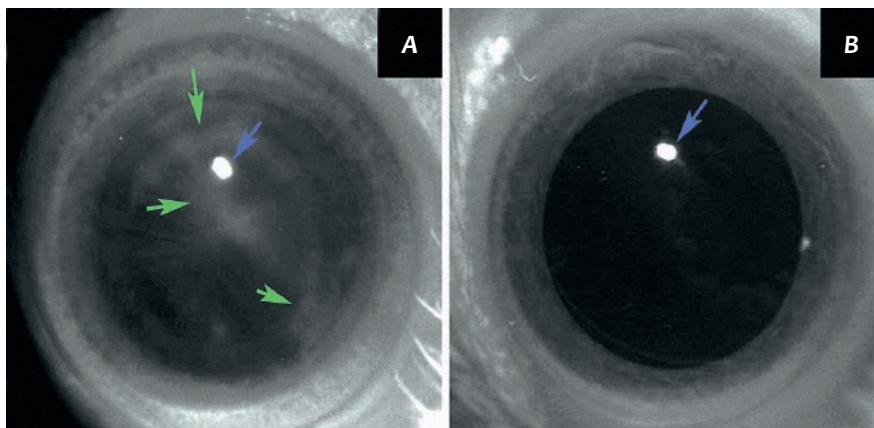
Будем надеяться, что в недалеком будущем при обычном профилактическом осмотре врач после десятиминутного обследования сможет сказать пациенту, что он в группе риска и что было бы совсем неплохо немедленно начать капать в глаз антикатарактальные препараты.



**ВОПРОС
ТЕПЕРЬ В ТОМ,
ЧТО КАПАТЬ?**

Мы направили свои усилия на создание препарата, который помогал бы альфа-кристаллину предотвращать агрегацию бета- и гамма-кристаллинов. Такой комбинированный препарат нами недавно был разработан. В его основе два вещества — *N*-ацетилкарнозин и пантетин.

Почему *N*-ацетилкарнозин? Он представляет собой производное карнозина. Карнозин был открыт еще в 1900 г. В.С. Гулевичем и подробно изучен его учеником С.Е. Севериным. Ученик С.Е. Северина А.А. Болдырев и М.А. Бабижаев попытались использовать его в качестве антикатарактального препарата антиоксидантного действия. Оказалось, однако, что карнозин и еще в большей степени *N*-ацетилкарнозин не столько предотвращают окисление белков, сколько эффективно тормозят их агрегацию, причем в очень низких концентрациях.



Антикатарактальный эффект смеси *N*-ацетилкарнозина и пантетина: А — ультрафиолетовая катаракта у крысы, зеленая стрелка отмечает помутнения хрусталика, синяя стрелка — отражение света осветителя; В — прозрачный хрусталик после лечения

Иными словами, *N*-ацетилкарнозин явно проявлял шапероноподобные свойства, похожие на свойства альфа-кристаллина.

Почему пантетин? Оказалось, что он существенно повышает способность альфа-кристаллина защищать поврежденные белки от агрегации. В содружестве с сотрудниками НИИ глазных болезней мы подробно исследовали антикатарактальный эффект нашего комплексного препарата *in vivo*. На модели ультрафиолетовой катаракты у крыс было показано, что смесь *N*-ацетилкарнозина и пантетина действительно эффективно предотвращает развитие катаракты.

Итак, теперь ясно, какой именно прибор требуется для сверхраннего обнаружения опасности помутнения хрусталика. Понятно, что комбинация антиоксидантных и шапероноподобных препаратов может оказаться эффективным лекарством для предотвращения катаракты. Нами создан и запатентован шапероноподобный препарат, усиливающий защитное действие альфа-кристаллина, но, увы, до клиники он пока не дошел.

Совершенно очевидно, что впечатляющие успехи в понимании природы прозрачности хрусталика и ее поддержании, знание механизмов нарушения этой прозрачности в самом скором времени приведут к эффективной лекарственной профилактике развития катаракты. И тогда ее хирургическое лечение — замена помутневшего хрусталика на искусственный — перестанет быть единственным и неизбежным способом вернуть зрение больным людям.

Хрусталик — действительно чудо природы, и беречь его надо так, как и полагается беречь зеницу ока. ■



ЗДРАВООХРАНЕНИЕ

КАК

Начинают появляться

COVID-19

объяснения природы

ПОРАЖАЕТ

этого феномена

ОРГАНЫ

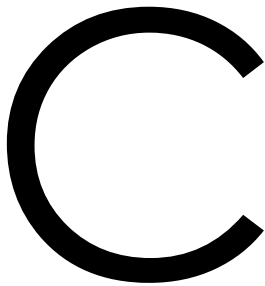
на молекулярном уровне

ЧУВСТВ

Стефани Сазерленд

ОБ АВТОРЕ

Стефани Сазерленд (Stephani Sutherland) — журналистка, пишет научно-популярные статьи на темы, связанные с нейронауками, живет в Калифорнии.



Эйаном Кантором это случилось в один из выходных в начале апреля. Он заваривал свежие листья мяты — и вдруг осознал, что совершенно не чувствует запаха напитка. Эйан бросился к холодильнику, понюхал банки с разными соленьями и мариладами, соус чили, чеснок, острый перец — ничего!

Совсем недавно, в конце марта 2020 г., в Нью-Йорке был введен локдаун и Эйан с подругой не выходили из дома. Ни о каком коронавирусе они и не думали, хотя у Эйана была небольшая температура. «Просто сезонная аллергия», — решил он. Но когда спустя какое-то время ему пришлось обратиться к врачу по поводу проблем с обонянием, был поставлен диагноз — anosmia. Потом Эйан сделал тест на антитела к бушевавшему вирусу. Их уровень зашкаливал. Так, значит, он переболел COVID-19!

По предварительным оценкам, у 80% заразившихся новым штаммом коронавируса пропадает обоняние, а у многих возникают дисгевзия или агевзия (извращение вкуса или утрата вкусовой чувствительности соответственно) либо изменения хеместезиса (утрата ощущения воздействия химических раздражителей). Потеря обоняния у инфицированных вирусом SARS-CoV-2 происходит так часто, что используется как диагностический признак, более характерный для этой инфекции, чем лихорадка или другие симптомы.

Каким образом новый штамм коронавируса вызывает расстройства ощущений у своих жертв? Когда пандемия только начиналась, клиницисты высказывали наводящее ужас предположение, что вирус, попав в организм человека через дыхательные пути, затем проникает в головной мозг, где может вызвать нарушения с далеко идущими губительными последствиями. Один из возможных механизмов мог бы заключаться в воздействии вируса на обонятельные нейроны, которые воспринимают запахи и передают соответствующие сигналы в головной мозг. Но Сандип Роберт Датта (Sandeep Robert Datta), нейробиолог из Гарвардской медицинской школы, отвергает эту гипотезу. «По имеющимся на сегодня данным, исходной мишенью вируса действительно становится назальный эпителий,

точнее те его клетки, которые отвечают за восприятие запаха, — говорит он. — Скорее всего, вирус атакует в основном поддерживающие и стволовые клетки, а не сами нейроны». Впрочем, это не исключает возможности поражения последних.

У обонятельных нейронов отсутствуют рецепторы ангиотензинпревращающего фермента 2 (ACE2), который опосредует проникновение вирусных частиц в клетку. Но поддерживающие клетки, фиксирующие эти нейроны, буквально усеяны упомянутыми рецепторами. Они обеспечивают тонкую регуляцию солевого баланса в слизистой носа, что влияет на передачу сигналов в головной мозг. Если такой баланс нарушается, сигнал блокируется, а значит нарушается и восприятие запахов. Поддерживающие клетки, кроме того, обеспечивают метаболическую и физическую стабильность волосков на поверхности нейронов, где сконцентрированы рецепторы запаха. Если волоски повреждены, вы утрачиваете обоняние.

В исследовании, проведенном микробиологом Николя Менье (Nicolas Meunier) с сотрудниками из Университета Париж-Сакле, золотистым хомьячкам вводили через нос вирус SARS-CoV-2. Всего через два дня все поддерживающие клетки были инфицированы — в отличие от обонятельных нейронов, в которых вирус не обнаруживался даже спустя две недели. Более того: произошло полное отслоение обонятельного эпителия. По словам Менье, это было похоже на последствия солнечного ожога. При том что обонятельные нейроны оставались интактными, покрывающие их волоски (следовательно, и рецепторы запаха) выходили из строя и человек терял обоняние.

Но остается неясным, связаны ли все эти повреждения с вредоносным действием вируса или всему виной клетки иммунной системы, приток которых к месту инфицирования зарегистрировал

Менье. Повсеместно наблюдаемая при заражении SARS-CoV-2 anosmia для других вирусных инфекций нехарактерна. Как показали результаты исследований, проведенных ранее в его лаборатории, инфицирование поддерживающих клеток происходит очень редко, при этом вирус SARS-CoV-2 обнаруживается примерно в половине из них. При других вирусных респираторных заболеваниях утрата обоняния связана с заложенностью носа, но при COVID-19 данный симптом обычно отсутствует. Вкусовые рецепторы, которые реагируют на присутствие в слюне различных химических веществ и посылают сигналы об этом в головной мозг, не содержат ACE2, и, возможно, поэтому SARS-CoV-2 в них не проникает. Зато этот фермент есть у опорных клеток, с чем, по-видимому, и связана потеря вкусовых ощущений у некоторых инфицированных.

Нет ясности и по другому симптому COVID-19 — изменениям хеместезиса. Потеря чувствительности к жгучим веществам не связана с потерей чувствительности к запахам или вкусу. Такое раздражающее воздействие направлено на болевые рецепторы (некоторые из них содержат ACE2), рассеянные по всему телу и, в частности, наличествующие и в ротовой полости.

Некоторые ответы на вопрос о механизме потери обоняния при COVID-19 дает обследование переболевших, у которых это ощущение восстановилось. «Большинство из них сравнивают весь процесс с внезапным исключением света и быстрым его включением через какое-то время, — говорит Датта. — Но есть и такие, у кого anosmia длится долго, а у некоторых вообще не проходит». Обонятельный эпителий постоянно обновляется. «Таким способом наш организм защищается от токсинов, содержащихся в воздухе», — говорит Менье. Но вот что произошло с Кантором: минуло семь месяцев с тех пор, как он впервые осознал, что потерял обоняние, и до сих пор оно к нему не вернулось.

Кэрол Ян (Carol Yan), ринолог из Калифорнийского университета в Сан-Диего, уверена, что anosmia представляет серьезную угрозу для здоровья. «Она приводит к повышению смертности. Не ощущая запаха, вы можете съесть испорченные продукты или не заметить утечки газа», — говорит она.

Внимания заслуживает и такое нарушение восприятия, как паросмия (извращение обоняния), один из симптомов выздоровления переболевших с длительной anosmией. Одна из таких пациенток, 27-летняя жительница Новой Зеландии Фрейя Собридж, заразилась COVID-19 в марте прошлого года. В течение нескольких недель она не ощущала ни вкуса, ни запахов, все, что она ела, было безвкусным и напоминало жеваную бумагу. Затем она стала различать сладкое, соленое и кислое, но без всяких нюансов — того, что составляет аромат.

Примерно через шесть месяцев появилось ощущение некоторых запахов, но в извращенном виде. «Какое-то время все, что я ела, имело запах клубники, — рассказывает Собридж. — Запах лука непереносим, все вокруг кажется пропитанным какими-то химикатами, а пищу будто обрызгали жидкостью для мытья окон». Паросмия может возникать, когда новые стволовые клетки превращаются в нейроны, которые начинают образовывать длинные отростки — аксоны. Последние проникают в головной мозг через крошечные поры в основании черепа и связываются там со специфическими структурами — обонятельными луковицами. Иногда аксоны образуют неправильные контакты, и тогда вкусовые ощущения искажаются, но со временем надлежащее соединение самопроизвольно восстанавливается.

Это хорошая новость для таких пациентов, как Собридж. Вопрос только в том, когда все встанет на место. «Ответа на него мы не знаем, — говорит Ян. — Чувствительность к запахам у переболевших гриппом при шестимесячной anosmией восстанавливается спонтанно у 30–50% пациентов, но известны случаи, когда восстановление длится два года, а иногда излечение вообще не происходит. Что же касается больных COVID-19, то шансы на полное восстановление обоняния непредсказуемы».

Ян рекомендует промывать пазухи носа будезонидом, стероидом, применяемым для лечения больных гриппом и утративших обоняние более чем на шесть месяцев после выздоровления. Еще один потенциально перспективный подход, апробируемый Ян с сотрудниками, основан на применении обогащенной тромбоцитами плазмы, которую используют как противовоспалительное средство для устранения некоторых форм повреждения нервов. Но, как и во всех других случаях, результат нельзя назвать впечатляющим. «Хорошо, если вы почувствуете запах мыла и некоторых пищевых продуктов», — говорит Ян.

И еще одно замечание по поводу anosmией: есть указания на то, что она повышает риск некоторых нейродегенеративных заболеваний. «После пандемии гриппа 1919 г. резко возросло число людей, страдающих болезнью Паркинсона, — напоминает Менье. — Что-то подобное может случиться и сейчас». Но, как считает Ян, эти страхи не вполне обоснованы. «Связь между anosmией и развитием тех или иных патологий несомненна, но, по нашему мнению, anosmia, связанная с вирусной инфекцией, развивается по другому механизму», — говорит она. Это еще одна хорошая новость для Собридж и Кантора, а также миллионов других людей по всему земному шару, потерявших обоняние в связи с COVID-19. ■

Перевод: Н.Н. Шафрановская



Иммунный хаос при COVID-19

Вирус процветает, подавив
защитную систему организма

Патрик Вонг и Акико Ивасаки

ОБ АВТОРАХ

Патрик Вонг (Patrick Wong) — аспирант в лаборатории Акико Ивасаки в Йельском университете.

Акико Ивасаки (Akiko Iwasaki) — профессор кафедры иммунологии и кафедры молекулярной и клеточной биологии и биологии развития Йельского университета, а также исследователь в Медицинском институте Говарда Хьюза.



XXI

в. в нашей памяти разделился на две части: время до SARS-CoV-2 и то, что случилось потом. Хотя об опасности глобальной смертельной пандемии предупреждали десятилетиями, во всем мире системы здравоохранения оказались абсолютно

не готовы. Первые пациенты с COVID-19 были госпитализированы в китайском городе Ухане 16 декабря 2019 г., некоторые из них умерли. Многие американцы рассчитывали, что даже если Китаю не удастся удержать вирус на своей территории, то через океан болезнь не переберется. В этих беззаботных рассуждениях игнорировался тот факт, что во время предыдущих коронавирусных вспышек — тяжелого острого респираторного синдрома, вызванного SARS-CoV, и ближневосточного респираторного синдрома, вызванного MERS-CoV, — вирусы добрались до нескольких континентов, а MERS-CoV продолжает распространяться и до сих пор.

SARS-CoV-2 прибыл в Америку в начале 2020 г. Реакция системы здравоохранения была хаотичной и различалась от региона к региону. В некоторых городах и штатах призывали оставаться дома и требовали носить маски. В других просто понадеялись на лучшее. На момент написания этой статьи во всем мире от COVID-19 умерло 1,3 млн человек.

Несмотря на отсутствие четкой организации, медики и ученые приложили значительные усилия для борьбы с угрозой еще до того, как она достигла США. Менее чем через год благодаря общемировым стараниям удалось чрезвычайно многое выяснить о коронавирусе и о его влиянии на организм человека. Теперь мы начинаем понимать, почему SARS-CoV-2 может вызывать очень разную тяжесть заболевания. У некоторых людей симптомы не проявляются; у других начинается кашель и поднимается

температура. В наиболее тяжелых случаях у пациентов развиваются опасная для жизни пневмония и острый респираторный дистресс-синдром (ОРДС).

Сейчас исследователям известно, что такие вирусы, как SARS-CoV и MERS-CoV, могут спровоцировать у иммунной системы неадекватную реакцию и возникающее в результате воспаление приводит к ОРДС и множеству опасных симптомов. С помощью легкодоступных клинических анализов в крови у тяжело больных пациентов четко выявляются высокие уровни иммунных белков IL-6 (интерлейкина 6), TNF- α (фактора некроза опухоли альфа) и CRP (С-реактивного белка). Через несколько месяцев после начала пандемии был показан долгожданный, хотя и скромный эффект от применения разных иммуносупрессоров, например кортикостероидов преднизона и дексаметазона; таким

образом, подтверждалось представление, что у наиболее тяжело больных пациентов иммунная система запустила гиперовоспалительную реакцию. Эти же противовоспалительные средства в прошлом широко использовались при тяжелых заболеваниях, вызванных другими коронавирусами.

Теперь известно, что у некоторых пациентов с COVID-19 чрезмерный иммунный ответ вызывает повреждения всего организма, способствуя образованию тромбов, повреждению сердца и даже отказу органов. При тяжелых случаях требуется госпитализация в отделения интенсивной терапии. Стандартного набора стероидов недостаточно для лечения тяжелого COVID-19: таким пациентам требуется более специфическое лечение. И нам очень нужны экспресс-тесты, чтобы выявлять в образцах индикаторы, или биомаркеры, предсказывающие дальнейшее течение заболевания, например вероятность того, что у пациента легкая форма COVID-19 перейдет в тяжелую.

Неадекватные иммунные реакции

Для того чтобы подобрать биомаркеры и методы лечения, нужно хорошо понимать, как SARS-CoV-2 взаимодействует с клетками во всем организме и как иммунная система реагирует на проникновение вируса. Прошлой весной наша лаборатория, сотрудничая со многими другими, приступила к изучению неконтролируемых иммунных реакций, с которыми связано развитие тяжелых форм COVID-19. Начиная исследование, мы знали, что при вторжении патогенов иммунная система обеспечивает сложную цепь ответных реакций. Мы также знали, что если какой-то из этапов иммунного ответа произойдет не вовремя, то это может привести к чрезмерному воспалению и повреждению собственных тканей организма.

В арсенале у иммунной системы имеется быстрый, экстренный способ реагирования и более медленная, но долгосрочная система защиты от вирусов, бактерий, грибов и других патогенов. «Врожденная» форма иммунного ответа срабатывает первой. Некоторые рецепторы на поверхности и внутри клеток иммунной системы реагируют на чужаков и активируют сложный сигнальный каскад с помощью цитокинов. Цитокины сообщают соседним клеткам, что надо защищаться, вызывают гибель зараженной клетки или усиливают сигнал тревоги, вовлекая другие типы цитокинов. Кроме того, клетки, обеспечивающие врожденный иммунный ответ, запускают



Лаборатории всего мира адаптировали свою работу для борьбы с COVID-19. В Сиене (Италия) лаборатория биологической безопасности разрабатывает тест на антитела.

мобилизацию определенных лейкоцитов для формирования более прочного иммунитета к патогену. В течение одной-двух недель клетки иммунной системы, обеспечивающие приобретенный ответ, активируются, повышается уровень высокоспецифичных антител и T-клеток, которые в итоге блокируют или убивают захватчика.

У большинства пациентов с COVID-19 врожденный иммунитет работает именно так, как надо, разоружая и убивая SARS-CoV-2. Однако примерно в 5% случаев организм ведет контратаку не так, как было запланировано. Если в этом сложном каскаде сигналов нарушается синхронизация, то в результате врожденного иммунного ответа образуется слишком много цитокинов. Перепроизводство разных сигнальных молекул при COVID-19 похоже на так называемый цитокиновый шторм, который возникает при других заболеваниях, и тогда болезнь протекает тяжело. Недавно было показано, что в большинстве случаев развивающееся воспаление отличается от цитокинового шторма, но все равно смертельно опасно для пациентов. Оно способно привести к ОРДС и в результате к долгосрочному повреждению легочной и других тканей. Может также произойти накопление фибрина — белка, вызывающего свертывание крови. Кроме того, возможен выход жидкости из кровеносных сосудов, что приводит к дыхательной недостаточности.

Вирусы используют человеческие клетки для размножения. Одна из форм врожденного иммунитета мешает вирусу размножаться, но, похоже, она слабо помогает в борьбе с SARS-CoV-2. В последние месяцы

COVID-19 дестабилизирует иммунную систему тремя способами

Вирус изобретает изощренные стратегии, чтобы перехитрить защитные силы организма. Вирус SARS-CoV-2, вызывающий COVID-19, мастерски обходит сложно скоординированную контратаку клеток и белков иммунной системы. Применяемая вирусом тактика уклонения может привести к бурному воспалению, повреждающему ткани не только в легких, но и во всем теле. Кроме того, SARS-CoV-2 непонятным образом мешает Т-лимфоцитам, которые занимаются ликвидацией инфицированных клеток. Сейчас разрабатываются методы лечения, направленные на восстановление нормальной противовирусной работы иммунной системы.

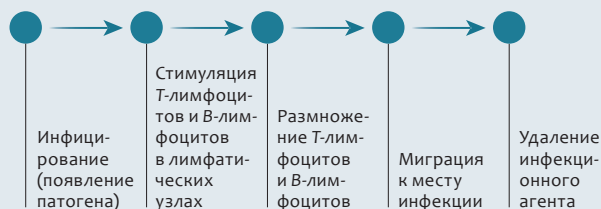
Быстрые и медленные способы самообороны

В ответ на вторжение патогенов иммунная система запускает срочный и долговременный ответы. Обеспечивающие быстрый ответ клетки и белки поднимают тревогу и организуют химическую защиту для уничтожения захватчиков. Позже, в течение недели или двух, белые клетки крови — Т-лимфоциты и производящие антитела В-лимфоциты — размножаются и перемещаются к источникам инфекции, обеспечивая долгосрочную защиту на случай, если патоген появится снова.

Врожденный иммунный ответ (быстрый)



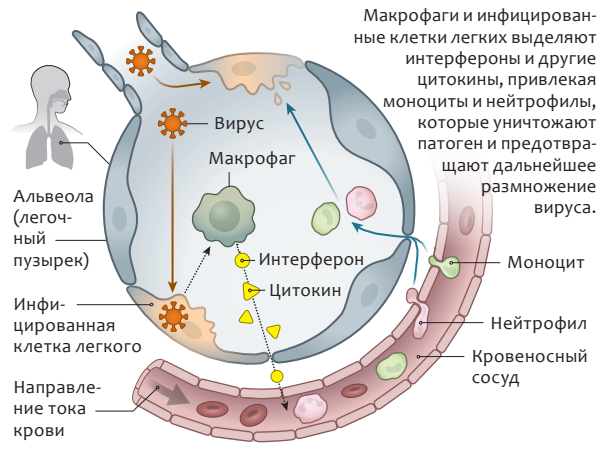
Приобретенный иммунный ответ (долговременный)



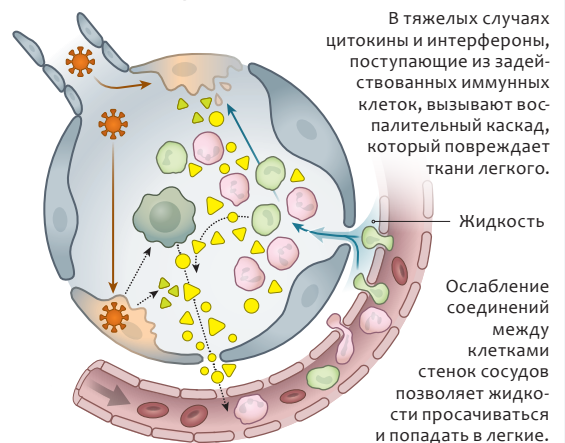
Врожденный иммунный ответ и цитокиновый шторм

Когда врожденный иммунный ответ происходит должным образом, происходят обезвреживание и уничтожение вируса SARS-CoV-2. Но вирус может обойти этот тонко настроенный процесс, и в результате начинается хаос. Слишком много сигнальных молекул цитокинов попадает к месту инфекции, в итоге повреждение усиливается. Воспаление в зараженных клетках легкого приводит к повреждению тканей, жидкость начинает просачиваться из близлежащих кровеносных сосудов и попадает в легкие.

Полезная воспалительная реакция



Опасная воспалительная реакция



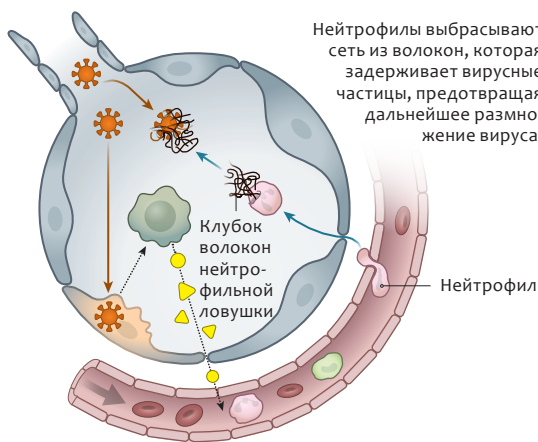
пристальное внимание исследователей привлекли к себе интерфероны — класс цитокинов, которые обеспечивают первую линию защиты, блокируя различные этапы репликации вируса в клетке. Быстро вырабатывая интерферон первого типа (ИНФ-1), иммунная система может взять вирус под контроль, так что заболевание не будет прогрессировать и пройдет в легкой форме. Однако в некоторых исследованиях выяснилось, что у пожилых людей или у пациентов, получивших большую вирусную нагрузку, иммунная система может реагировать

с опозданием, так что сначала вирусы продолжают размножаться. Затем, когда интерфероны наконец появляются, они могут стимулировать выделение слишком большого количества разнообразных цитокинов, что приводит к воспалению и тяжелым формам заболевания. Оценивая интенсивность интерферонного ответа, можно узнать жизненно важную информацию: будет ли заболевание прогрессировать до смертельно опасной формы. Кроме того, это поможет понять, как именно лечить инфекцию.

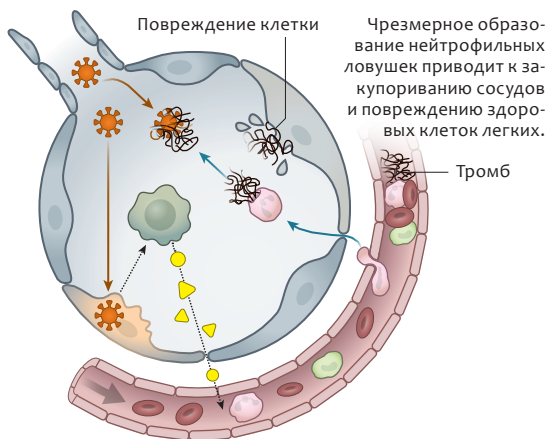
Паутиноподобные ловушки для микробов

В крови некоторых пациентов с COVID-19 обнаруживается избыточное количество белых клеток крови нейтрофилов, занимающихся поглощением патогенов. Их присутствие можно использовать для прогнозирования тяжелого течения заболевания. Эти клетки способны выбрасывать паутиноподобные нити — нейтрофильные внеклеточные ловушки для вылавливания и уничтожения вирусов и других патогенов. Но при сильном воспалении такие ловушки могут стать опасными и способствовать образованию тромбов и повреждению клеток легких.

Полезное действие нейтрофильных внеклеточных ловушек



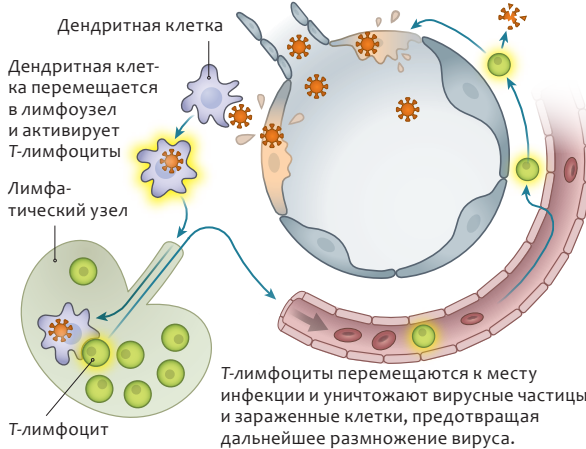
Опасное действие нейтрофильных внеклеточных ловушек



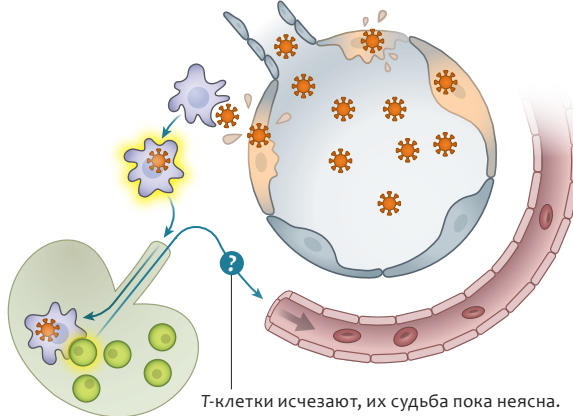
Длительная защита и утрата T-лимфоцитов

В процессе реализации приобретенного иммунного ответа запускается формирование T-лимфоцитов, которые начинают борьбу с вирусом несколько позже после заражения. T-лимфоциты перемещаются из лимфатических узлов к месту инфекции после активации дендритными клетками. При COVID-19 количество T-лимфоцитов, способных выйти и начать борьбу с вирусом, может значительно уменьшаться по непонятным причинам, которые исследователи сейчас выясняют.

Полезное действие T-лимфоцитов



Нарушение действия T-лимфоцитов



Исследования еще ведутся, но уже понятно, что иммунный ответ может нарушаться разными способами. Например, вирус способен затруднять выработку интерферонов или же конкретный пациент может вырабатывать меньше ИНФ-I по генетическим причинам. Бывает, иммунитет работает столь странно, что организм даже производит антитела к ИНФ-I. Мы и другие ученые рассматриваем такие «аутоантитела» как возможную причину длительного сохранения симптомов при COVID-19. Аутоантитела могут послужить полезным биомаркером для

предсказания ухудшения состояния пациента. Некоторым больным может быть полезно введение интерферона, полученного в лаборатории, и клинические испытания такого лечения уже начались, но пока нет четких результатов.

Взрывное воспаление

Цитокиновый шторм активно обсуждался еще в связи с тяжелыми случаями заболеваний, вызванных предыдущими коронавирусами (SARS-CoV и MERS-CoV), поэтому естественно, что ученые предположили

Изменение работы нашей лаборатории

1 марта в Нью-Йорке был подтвержден первый случай COVID-19, и вскоре этот вирус стал самой смертоносной внебольничной инфекцией во всех городах США. Всего в 80 милях от Нью-Йорка, в Нью-Хейвене, мы ждали, когда Йельский университет объявит о закрытии, и это произошло 18 марта. Сначала карантинные меры повлияли на нас так же, как и на большинство американцев. Студентов немедленно распустили по домам. Лаборатории закрыли, студентам и сотрудникам запретили работать. Коронавирус распространялся по миру, а университетские подразделения с большим количеством квалифицированных ученых оказались в стороне. Правда, ненадолго. Вскоре наша жизнь кардинально изменилась.

Ученые всех уровней в один голос шутят и жалуются по поводу слишком тонкой грани между нашей научной и личной жизнью. Когда началась глобальная пандемия, эта грань стерлась для тех из нас, кто решил заняться SARS-CoV-2. Внезапный наплыв пациентов и неотложность задач, поставленных пандемией, лишили нас такой роскоши, как планирование экспериментов или неторопливое чтение газет. Мы стремительно переключились от изучения иммунного ответа при раке, герпесе и гриппе к выяснению роли иммунных реакций в COVID-19. И, разумеется, наша домашняя жизнь тоже радикально изменилась.

Поскольку наша лаборатория специализируется на иммунных реакциях на вирусные инфекции, мы обладали знаниями об иммунной системе, а также навыками работы со сложным лабораторным оборудованием и были

готовы этим поделиться. Наш отдел начал интенсивно сотрудничать с врачами, медсестрами и руководителями многих подразделений университета и больницы при университете. Как только стали поступать первые пациенты, у нас появилась возможность внести свой вклад в понимание механизмов действия SARS-CoV-2.

Мы сформировали команду сотрудников, назвали ее IMPACT (*Implementing Medical and Public Health Action against Coronavirus CT*, Реализация медицинских и здравоохранительных мер против коронавируса в Коннектикуте) и ежедневно выполняли множество тестов методом полимеразной цепной реакции (ПЦР), чтобы улучшить возможности нашего региона проверять на COVID-19 в подозрительных случаях. По сравнению с двухнедельным сроком проверки в коммерческих лабораториях у нас была потрясающая скорость: получая образцы утром, мы готовы были дать ответ менее чем через 12 часов. Тогда мы и не предполагали, что такая скорость скоро станет нормой для лабораторных исследований и что в дальнейшем мы вплотную займемся исследованием SARS-CoV-2.

Обычно научные исследования идут медленнее и им предшествует более длительное обдумывание, но во времена COVID-19 приходится заниматься наукой так же аккуратно, но значительно быстрее. Наши усилия по организации ПЦР-тестирования переросли в обширное изучение изменений в иммунных клетках у пациентов с SARS-CoV-2. Мы ежедневно получали партии крови пациентов, и за несколько часов красное

содержимое этих пробирок превращалось в точные цифры. У каждого пациента мы брали образцы на анализ примерно каждые четыре дня и за несколько месяцев сложили из этих одиночных кадров полную картину того, как иммунная система борется с SARS-CoV-2. Но главное — мы в режиме реального времени видели, почему при плохом течении болезни она становилась летальной.

В то же время другие лаборатории во всем мире спешно проводили аналогичные исследования. Как и ожидалось, эти параллельно направленные усилия давали схожие результаты — правда, иногда и противоречивые, причем чаще, чем хотелось бы. Но при работе с пациентами чрезвычайно важно подтвердить открытия, сделанные одной лабораторией, работами в другой и третьей.

Все люди разные, их лечат по-разному, мы не можем точно отследить все их особенности и все внешние факторы, такие, например, как количество полученных вирусов. Надежность полученных нами данных подтверждается тем, что исследователи из других стран пришли к аналогичным выводам.

Пандемия повлияла и на способ сообщения о наших открытиях. Вместо того чтобы месяцами ждать публикации в рецензируемых журналах, ученые сразу делились своими открытиями через такие ресурсы, как *BioRxiv* и *MedRxiv*. Это позволило быстро обмениваться информацией и идеями и мгновенно изменить процедуру научных публикаций. Из-за COVID-19 произошли кардинальные изменения в проведении научных исследований.

действие аналогичного механизма, когда появился SARS-CoV-2. В начале пандемии врачи действительно обнаружили повышение уровня цитокинов у пациентов, но количество этих веществ и воспалительное состояние, которое они вызывали, отличались от классического цитокинового шторма.

У этих пациентов были обнаружены высокие уровни цитокиновых белков, которые в зависимости от того, на какую клетку воздействуют, могут вызвать целый ряд последствий, и в том числе губительные. Некоторые цитокины, такие как *IL-6*, *TNF-α*, *IL-1β* и *IL-12*, усиливают воспаление и повреждение тканей. Дайан Мари Дель Валле (*Diane Marie Del Valle*) из Медицинской школы Айкана при Медицинском центре «Маунт-Синай» вместе с коллегами оценивали повышение уровня некоторых цитокинов в крови у 1,5 тыс. пациентов из Нью-Йоркской

агломерации. Они показали, что аномально высокие уровни *IL-6* и *TNF-α* могут достоверно предсказывать тяжесть заболевания и возможный смертельный исход.

Мы отмечали те же изменения у пациентов, за которыми наблюдали. Более того, и наша лаборатория, и другие исследователи обнаружили некоторые необычные варианты цитокиновых профилей пациентов, непохожие на типичный цитокиновый шторм. Мы наблюдали высокие уровни цитокинов *IL-5* и *IL-17*, нехарактерных для противовирусной иммунной активности. Эти цитокины запускают, по-видимому, ошибочную реакцию, которая больше подошла бы для борьбы с паразитическими простейшими или грибами. Мы пока не знаем, вызывает ли данная реакция повреждение тканей или просто отвлекает ресурсы организма от борьбы с вирусами.

У некоторых пациентов с *COVID-19* мы обнаружили также высокий уровень хемокинов — это подкласс цитокинов, направляющих иммунные клетки туда, где они необходимы. Хемокины *CCL2*, *CCL7*, *CXCL9* и *IL-8*, накапливаясь в высокой концентрации в местах заражения, как будто трубят сбор. Мало того что цитокины и другие сигналы иммунной системы вызывают локальное повреждение, хемокины вдобавок приглашают вступить в борьбу клетки со всего тела.

Для того чтобы выяснить причину повреждения тканей, некоторые группы исследователей занялись изучением клеток крови и легких. В иммунологии мы обычно используем проточную цитометрию; применяя эту методику, можно пометить определенные подтипы клеток флуоресцентными антителами. Благодаря таким маркерам наша группа обнаружила, что у пациентов, по сравнению со здоровыми людьми, имеются значительные изменения в популяциях иммунных клеток. Особенно многочисленными были два типа клеток, связанных с врожденным иммунным ответом, — моноциты и нейтрофилы.

Для примера: у здоровых доноров моноциты составляют от 10% до 20% мононуклеарных клеток периферической крови, то есть тех лейкоцитов, которые обычно анализируют. Однако мы часто наблюдали, что у больных *COVID-19* доля моноцитов превышала нормальный уровень в три раза и более.

Моноциты — важные участники врожденного иммунного ответа, они занимаются патрулированием в крови и первыми прибывают на место происшествия, чтобы уничтожить или изолировать патоген. Если они обнаруживают угрозу со стороны микробов, они могут дифференцироваться в специальные типы лейкоцитов — макрофаги и дендритные клетки. Макрофаги поглощают патоген и продукты клеточного распада. Дендритные клетки узнают и помечают патоген, чтобы на него отреагировали другие клетки иммунной системы.

Для того чтобы иммунная система не реагировала слишком бурно, количество моноцитов обычно жестко регулируется, но при тяжелом течении *COVID-19* такой контроль нарушается. В тяжелых случаях моноциты и макрофаги проникают в легкие. Когда Минфэн Ляо (Mingfeng Liao) с коллегами из китайского Национального центра клинических исследований инфекционных заболеваний в Шэньчжэне изучили легкие пациентов с тяжелой формой *COVID-19*, взяв

для анализа клетки в жидкости из нижних дыхательных путей с помощью процедуры, которая называется «бронхоальвеолярный лаваж» (БАЛ), они обнаружили там множество моноцитов и макрофагов. По данным других авторов, оба типа клеток выделяют цитокины в количествах, характерных для тяжелого воспаления. Поскольку предполагается, что повреждение возникает из-за интенсивного выделения цитокинов моноцитами и макрофагами, то вмешательства, блокирующие их провоспалительную активность, могут предотвратить переход заболевания в тяжелую форму.

Если тяжелое течение *COVID-19* действительно в основном вызвано цитокинами, было бы логично попытаться уменьшить их количество у пациентов. Это можно сделать, например, с помощью такого лекарства, как тоцилизумаб. Препарат блокирует рецепто-

Никогда еще переход от лабораторного стола к постели пациента не происходил так быстро, и эти нововведения сохранятся, чтобы помочь противостоять пандемиям в будущем

ры к цитокину *IL-6*. К сожалению, в клинических исследованиях выяснилось, что его использование не оказывает положительного влияния на исход заболевания. Поэтому все больше ученых и медиков не ограничиваются версией о цитокиновом шторме, а начинают поиски более полного объяснения повреждающих гиперовоспалительных реакций при *COVID-19*.

Дополнительным фактором, способствующим неадекватной иммунной реакции при *COVID-19*, может быть пептид брадикинин. Майкл Гарвин (Michael R. Garvin) из Ок-Риджской национальной лаборатории в штате Теннесси с коллегами выдвинули гипотезу, что брадикинин, подобно цитокинам, может вызывать воспалительную реакцию. Точнее, такой «брадикининовый шторм» может усиливаться под влиянием провоспалительных цитокинов. Избыток брадикинина приводит к чрезмерному расширению кровеносных сосудов и многим неожиданным симптомам, наблюдаемым у пациентов с *COVID-19*, таким как сердечная аритмия и внезапная остановка сердца.

Кроме того, у тяжелобольных пациентов исследователи обнаружили значительное увеличение количества гиалуроновой кислоты. В скоплениях этого вещества может удерживаться большое количество воды. При посмертном анализе сильно пострадавшей легочной ткани выяснилось, что для некоторых пациентов сочетание этих факторов с просачиванием жидкости из кровеносных сосудов оказалось фатальным.

Роль брадикинина в клинической картине COVID-19 требует дальнейшего подтверждения. Напрямую оценить количество этого пептида пока чрезвычайно трудно. Но определенные успехи, полученные в исследованиях с использованием ингибитора брадикининовых рецепторов икатибанта, свидетельствуют в пользу гипотезы о том, что более низкий уровень данного пептида может способствовать более легкому течению заболевания.

Ловушки для вредоносных микробов

С брадикинином связан и другой воспалительный процесс, также наблюдаемый в крови у больных. Выработку брадикинина могут активировать нейтрофилы, занимающиеся поглощением патогенов. Несколько лабораторий, и наша в том числе, обнаружили чрезмерное количество нейтрофилов в крови некоторых пациентов. Высокий уровень *IL-8* при COVID-19 может способствовать увеличению количества нейтрофилов и привлекать их туда, где есть инфекция, в том числе в легкие. Тут важно отметить, что наличие повышенного уровня нейтрофилов в первый день госпитализации достоверно увеличивает вероятность последующего попадания в отделение интенсивной терапии.

В недавних статьях обсуждается, почему нейтрофилы могут быть причиной патологий при COVID-19. Эти клетки образуют нейтрофильные внеклеточные ловушки, состоящие из нитей ДНК, белков с антимикробным действием и ферментов, блокирующих и уничтожающих патогены. К сожалению, они могут повреждать и собственные ткани организма.

Изучая легкие во время вскрытия, Мориц Леппке (Moritz Leppkes) из германского Университета им. Фридриха — Александра с коллегами обнаружили сильную закупорку мелких сосудов скоплениями этих ловушек. Исследователи также выявили их в кровеносных сосудах почек и печени. Помимо того что такие ловушки создают физические препятствия для тока крови, они еще

могут разрушать антикоагуляционные белки, способствуя таким образом чрезмерно высокой свертываемости крови при тяжелом течении заболевания. Учитывая предполагаемую роль таких скоплений, Университет Макгилла объявил о пилотном исследовании, в котором для расщепления ДНК в нейтрофильных ловушках используется лекарство от муковисцидоза.

Таким образом, в различных исследованиях показано, что при заражении SARS-CoV-2 иммунная система повреждает собственный организм. Врожденный иммунный ответ, обеспечиваемый цитокинами, моноцитами, нейтрофилами и другими участниками, выходит из-под контроля. С приобретенным иммунитетом тоже не все гладко. В отличие от здоровых людей в крови некоторых пациентов с COVID-19 содержится значительно меньшее количество Т-лимфоцитов, которые выступают как важнейший компонент долговременного приобретенного иммунитета.

Исследователи обнаружили, что Т-лимфоциты у пациентов со средней тяжестью заболевания ведут себя иначе, чем у тяжелобольных. Обычно популяции Т-лимфоцитов, специфичные к определенному патогену, сильно увеличиваются в численности, чтобы обеспечить защиту организму, но у пациентов с тяжелым течением COVID-19 это не происходит.

Существует два типа Т-лимфоцитов: первые непосредственно уничтожают зараженные вирусом клетки, а вторые координируют реакцию на инфекцию в зависимости от сигналов, полученных от цитокинов. У пациентов, госпитализированных с COVID-19, наблюдалось снижение количества Т-лимфоцитов обоих типов, но это встречается и при других респираторных инфекциях. Однако у некоторых больных сниженный уровень Т-лимфоцитов сохранялся необычно долго — до нескольких недель. Из исследований других респираторных вирусов известно, что Т-лимфоциты могут перемещаться из крови в инфицированные ткани. У пациентов с этими вирусами наблюдались повышенный уровень хемокинов, таких как *CXCL9* и *CXCL10*, которые направляют Т-лимфоциты в инфицированные области. Но хотя мы обнаружили большое количество хемокинов в крови у пациентов с COVID-19, мы не нашли там аналогичного количества Т-лимфоцитов.

В ряде работ изучались легкие, в которых обосновался вирус у больных с тяжелой

формой COVID-19. С помощью секвенирования РНК одиночных клеток ученые выявили несколько подмножеств иммунных клеток, и в том числе значительное количество T-лимфоцитов. Однако это открытие не дает исчерпывающего объяснения. Ни исследования ткани легких, ни патологоанатомическое изучение со вскрытием нескольких органов не отвечают на вопрос о низком количестве T-лимфоцитов в крови. Вполне вероятно, что клеток мало просто потому, что они умерли, и многие исследовательские группы действительно нашли подтверждения этому предположению.

Каким образом исчезают T-лимфоциты? У пациентов с COVID-19 было обнаружено повышенное количество T-клеток с рецепторами, через которые запускается преждевременная гибель клетки. Возможно также, что костный мозг не производит достаточно клеток-предшественников, из которых должны образовываться T-лимфоциты, и поэтому сокращается и количество зрелых клеток. При исследовании других заболеваний и старения выяснилось, что цитокины влияют на выработку предшественников T-лимфоцитов в костном мозге. Аналогичная связь для COVID-19 пока полностью не доказана, хотя тут задействованы те же провоспалительные цитокины. И, наконец, возможно, что сам вирус убивает T-лимфоциты. Есть надежда, что путем проверки этих гипотез удастся подобрать лечение, позволяющее увеличить количество T-лимфоцитов.

Многие тяжелые иммунологические проявления, наблюдаемые при COVID-19, такие как резкое повышение уровня цитокинов, выход в легкие клеток, связанных с воспалением, нейтрофильные внеклеточные ловушки и снижение количества лимфоцитов, встречаются и при других серьезных респираторных вирусных инфекциях. Но есть проблемы, характерные именно для вируса SARS-CoV-2. Его отличает беспрецедентная способность распространяться в период до появления симптомов и передаваться от бессимптомных носителей, у которых болезнь вообще не проявляется.

Вирус SARS-CoV, вызвавший эпидемию в 2003 г., наиболее интенсивно передается на десятый день после появления симптомов. У вируса MERS-CoV пик заразности наступает на седьмой-десятый день после появления симптомов. А у SARS-CoV-2 пик заразности приходится на третий-пятый день после появления симптомов. Из-за столь раннего пика вирус очень хорошо

передается еще до появления симптомов (которые у большинства появляются на четвертый-пятый день после заражения). Это означает, что зараженный человек может распространить большое количество вирусов, прежде чем почувствует хотя бы легкое першение в горле.

При COVID-19 могут проявляться симптомы поражения разных органов, это тоже необычно для респираторных вирусов. SARS-CoV-2 может вызывать потерю обоняния, спутанность сознания, желудочно-кишечные проблемы, образование тромбов, сердечно-сосудистые проблемы и даже «ковидные пальцы». Вирус может также поражать нейроны головного мозга. У выздоровевших восстановление поврежденных тканей может длиться месяцами.

В целом это все неудивительно. Во всех органах проходят кровеносные сосуды, в которых есть три типа клеток: эндотелиальные, перicyты и гладкомышечные. Все они усыпаны рецепторами ACE2, через которые SARS-CoV-2 проникает в клетки. Фактически они встречают SARS-CoV-2 с распростертыми объятиями. Хуже того, цитокиновый или брадикининовый шторм может повреждать ткани, образованные этими типами клеток.

Несмотря на то что предыдущий коронавирус SARS-CoV для входа в клетку использует тот же рецептор и может вызывать цитокиновый шторм и ОРДС, он обычно поражает легкие, а сообщения о серьезных повреждениях других органов единичны. В геномах этих вирусов 80% совпадают, и логично предположить, что различия между ними объясняются остальными 20% генома. Но может быть и более простое объяснение: SARS-CoV-2 заразил в 6,7 тыс. раз больше людей, чем его предшественник, причем сделал это на виду у научного сообщества.

Открытия и нововведения прошедших девяти месяцев свидетельствуют о чрезвычайной целеустремленности медиков и ученых. Никогда еще научные и медицинские сообщества так не объединяли свои усилия, и никогда еще переход от лабораторного стола к постели пациента не происходил настолько быстро, как в нынешних условиях. И эти достижения останутся с нами независимо от успешности испытаний какого-либо из сотен вариантов лечения COVID-19. Эти нововведения сохранятся, чтобы противостоять пандемиям в будущем. ■

Перевод: М.С. Багоцкая



adidas

SOUTH AFRICA

TOYOTA

SEMENYA

BEIJING 2015

СПОРТ

На основании тестостерона

Уровень гормонов в организме
становится орудием дискриминации
спортсменок

Грейс Хакинс



Олимпийская чемпионка Кастер Семеня из ЮАР в женском забеге на 800 м на Чемпионате мира по легкой атлетике в 2015 г. Возможно, она никогда больше не будет участвовать в соревнованиях.

ОБ АВТОРЕ

Грейс Хакинс (Grace Huckins) учится в аспирантуре по нейробиологии в Стэнфордском университете, окончила магистратуры по нейробиологии и феминологии в Оксфордском университете.



В феврале 2016 г. Дути Чанд стала лучшим спринтером среди женщин в Индии. Во время квалификационных забегов в крытом манеже в Катаре она установила рекорд, пробежав шестидесятиметровую дистанцию быстрее, чем это когда-либо удавалось индийским женщинам, и вскоре стала первой за последние десятилетия женщиной из Индии, выступавшей на стометровке на Олимпийских играх. Однако всего годом ранее Чанд была близка к тому, чтобы навсегда покинуть спорт.

Чанд добилась известности, еще выступая как юниор, и в 2014 г. Индийская федерация легкой атлетики (AFI) при поддержке Международной ассоциации легкоатлетических федераций (World Athletics, WA) запретила Чанд участвовать в соревнованиях среди женщин из-за того, что уровень тестостерона в ее организме был необычно высоким, хоть и по естественным причинам. Однако не было никаких оснований считать, что Чанд когда-либо принимала запрещенные препараты, влияющие на количество гормонов. По мнению AFI, организатора соревнований по легкой атлетике в Индии, повышенный уровень тестостерона давал Чанд физические преимущества, характерные для легкоатлетов-мужчин. Чанд оспорила в суде утверждение, что из-за гиперандрогении, то есть повышенного уровня андрогенов и в том числе тестостерона, она больше похожа на спринтера-мужчину, чем на женщину, и в 2015 г. Спортивный арбитражный суд с ней согласился. Суд постановил, что WA, которая устанавливает правила, регулирующие международные соревнования по легкой атлетике, не представила достаточного количества научных обоснований для подтверждения своих претензий и поэтому Чанд может продолжать выступать.

Сейчас Международная ассоциация легкоатлетических федераций утверждает, что нашла соответствующие научные обоснования, чтобы запретить женщинам с повышенным уровнем тестостерона выступать на дистанциях от 400 м до 1,5 тыс. м, но эти женщины могут принимать лекарства для снижения уровня тестостерона или соревноваться с мужчинами. Такая политика не коснется Чанд, потому что она бежит более короткие дистанции, но может положить конец спортивным надеждам олимпийской чемпионки Кастер Семени, которую в ее родной ЮАР считают национальной героиней. В 2019 г. Спортивный арбитражный суд согласился с аргументами WA, а в сентябре 2020 г. Федеральный суд Швейцарии оставил это решение в силе. Вместо того чтобы подвергнуться ненужному с медицинской точки зрения лечению для снижения уровня тестостерона, на Олимпийских играх в Токио в 2021 г. Семени решила участвовать только в забеге на 200 м, где нет ограничений по уровню тестостерона.

Такая последовательность противоречивых решений вызвала в обществе дискуссию о справедливости и дискриминации в спорте. На протяжении всей современной истории Олимпийских игр правила, кого считать



Дути Чанд (справа) из Индии в женском забеге на 200 м во время летних Азиатских игр 2018 г. Несколькими годами ранее ей запрещали участвовать в соревнованиях среди женщин.

женщиной, менялись по мере развития научных представлений о поле. Сейчас дискриминация спортсменок происходит на основании естественного уровня тестостерона.

Будучи специалистом и в области биологии, и в области гендерных исследований, я интересовалась тем, как ученые стараются превратить такие социальные категории, как «женщина» и «мужчина», в фундаментальные истины. По мере того как исследователи пытались выявить биологическую основу пола и гендера, природа предъявляла исключения из их правил. («Пол» — это биологическая характеристика, а «гендер» относится к социальной роли и идентификации.)

Большинство мужчин имеют XY-хромосомы, и еще в утробе матери у них образуются семенники, которые в более поздний период жизни выделяют в кровь относительно большое количество тестостерона. В то же время у большинства женщин есть XX-хромосомы, которые запускают формирование яичников и снижают уровень тестостерона. Однако у некоторых женщин, несмотря на внешне женскую анатомию, тем не менее есть XY-хромосомы, и эти женщины

страдают от политики WA. Черты, не позволяющие четко отнести человека к категории мужчин или женщин, называются интерсексуальными.

По данным организации по защите интерсексуалов *InterAct*, среди населения 1,7% могут быть интерсексуалами, хотя многие из них никогда об этом не узнают. А в большом спорте таких людей оказывается непропорционально много: Спортивный арбитражный суд в своем постановлении неоднократно ссылался на статистику, согласно которой в большом спорте женщины с XY-хромосомами встречаются значительно чаще, чем в среднем по популяции.

Таким образом, создается впечатление, что в спортивных соревнованиях у интерсексуальных женщин может быть преимущество. Однако это же касается и спортсменов, имеющих такие естественные черты, как, например, высокий рост в баскетболе. Некоторые половые особенности могут давать преимущества в спорте, но важно, действительно ли они настолько значимы и несомненны, что из-за них такие спортсмены, как Семена, не должны соревноваться с другими женщинами.

Хромосомы и гормоны

Пол никогда не был простым бинарным признаком. Тем не менее олимпийские регулирующие органы десятилетиями пытались применять простые правила к этой сложной сущности. С 1960-х по 1990-е гг. десятки женщин подверглись пристальному вниманию и даже были дисквалифицированы из-за своих хромосом. Первой оказалась Ева Клобуковская, которую признали женщиной после осмотра гениталий в 1966 г., но не допустили до Олимпийских игр в 1968 г. из-за наличия Y-хромосомы. В истории с Клобуковской нет ничего удивительного: некоторые интерсексуальные женщины анатомически настолько похожи на обычных женщин, что никогда не узнают про наличие у себя Y-хромосомы.

Таким образом, с помощью хромосомного тестирования были дисквалифицированы люди, имевшие все признаки женского пола кроме XX-хромосом. Из-за неоднозначности результатов, инвазивности некоторых способов тестирования и тяжелых социальных последствий для тех, кто не прошел проверку, в 1990-х гг. Международный олимпийский комитет (МОК) отказался от проверки пола. Но он продолжает заботиться о справедливости женских соревнований и оставил за собой право проводить тесты в отдельных случаях. В последнее время проверяют не набор хромосом, а то, что якобы сильнее связано со спортивными способностями: уровень тестостерона.

Надеясь улучшить результаты, спортсмены использовали искусственные способы повышения уровня тестостерона как минимум с 1950-х гг., но до 1990-х гг. медицинское сообщество не считало связь между дополнительным тестостероном и спортивными способностями научно обоснованной. Возможно, поэтому МОК не использовал оценку уровня тестостерона во времена проверки пола. Ситуация изменилась после 1996 г., когда было показано, что введение тестостерона в сочетании с силовыми тренировками способствует увеличению мышечной массы и силы у мужчин.

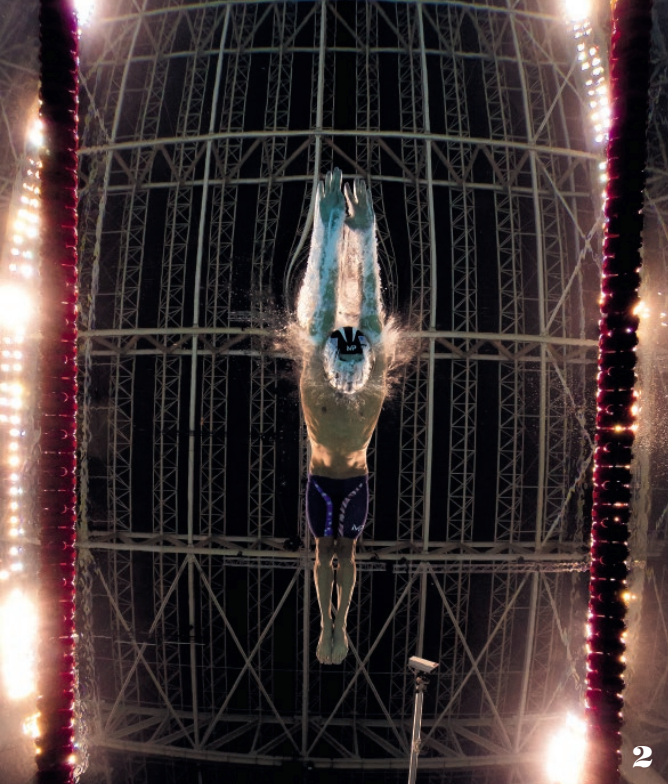
С тех пор представления эндокринологов о связи между тестостероном и мышечной массой значительно расширились. Выяснилось, что тестостерон одновременно увеличивает

количество мышечных клеток, образующихся в организме, и размер мышц. Есть также некоторые данные, что тестостерон может влиять на спортивные способности и другими путями. В одном эксперименте у мужчин, получавших большие дозы тестостерона (в отличие от тех, кто получал низкие), повышался уровень гемоглобина в крови, что позволяло обеспечивать организм большим количеством кислорода. Тестостерон может влиять и на кости, потому что низкий уровень тестостерона, так же как и низкий уровень эстрогенов, связан с остеопорозом, и оба гормона участвуют в поддержании структуры кости.

На самом деле андрогены («мужские» гормоны, к числу которых относится и тестостерон) и эстрогены («женские» гормоны) связаны друг с другом гораздо сильнее, чем думают большинство людей. Во-первых, каждый



человек естественным образом вырабатывает оба гормона. И все естественные эстрогены у людей образуются из тестостерона, превращаясь в эстроген под влиянием фермента ароматазы. Ученые спорят о том, какое количество каждого из гормонов считать «нормой» и как оценивать их уровни, и в одном недавнем исследовании даже предлагается скорректировать «норму» для женщин, чтобы она больше соответствовала наблюдаемому у женщин-спортсменок. Уровни эстрогенов у мужчин и женщин могут фактически совпадать, особенно во время некоторых фаз женского менструального цикла. В то же время количество тестостерона значительно различается: у молодых мужчин его содержание колеблется в крови от 10 до 40 нмоль/л, тогда как у женщин от 0,5 до 3 нмоль/л.



Необычные свойства, такие как рост 2,3 м у баскетболиста Мануте Бола (1) и сниженная утомляемость мышц у пловца Майкла Фелпса (2), обычно не становятся поводом для дисквалификации спортсмена

Совокупность имеющихся данных — различие количества тестостерона у большинства мужчин и большинства женщин, выявленная связь между введением тестостерона и увеличением мышечной массы, а также приблизительно десятипроцентное преимущество в большом спорте у мужчин над женщинами в соревнованиях по бегу — позволяет предположить, что женщины с высоким уровнем тестостерона могут бегать как мужчины. Тем не менее в случае с Чанд Спортивный арбитражный суд постановил, что она не может быть отстранена от соревнований, поскольку тогда еще не было прямых доказательств связи между естественным уровнем тестостерона и атлетическими способностями женщин в большом спорте.

Четыре года спустя, в случае с Семеней, суд принял другое решение, поскольку счел, что такие доказательства были предоставлены. Стефан Бермон (Stéphane Vergon) возглавляющий научную группу в Международной ассоциации легкоатлетических федераций, недавно опубликовал статью, где проанализировал данные двух международных соревнований по легкой атлетике и показал, что у женщин с высоким уровнем тестостерона результаты в среднем выше, чем у женщин с более низким уровнем. Поскольку это исследование основано на реальных данных женщин-бегунов в большом спорте, вероятно, на сегодня это наиболее убедительный аргумент в споре о гиперандрогении.

В рамках своей работы я выискиваю среди научных публикаций те, где исследователи допустили ошибки в статистике при исследовании групп, находящихся в уязвимом положении. Поэтому я заинтересовалась, прочитав, что ученые усомнились в достоверности этого ключевого исследования из-за проблем с исходными данными. Бермон отреагировал на их замечания и скорректировал исследование. В результате обнаруженный эффект оказался значительно слабее. А когда я применила для этих данных поправку на множественное сравнение — статистический метод, позволяющий учесть повышенную вероятность появления ложноположительного результата при проведении не одного, а сразу многих статистических тестов, — эффект вообще исчез.

Данное обстоятельство не означает, что нет никакой связи между тестостероном и спортивными достижениями у женщин. Но, безусловно, нужно гораздо больше исследований, чтобы можно было сделать однозначный вывод.

Введенный — не собственный

Если бы тестостерон, вводимый в организм незаконно, и тестостерон, вырабатываемый самим организмом, влияли на всех одинаково, можно было бы предположить, что типичное для мужчин количество тестостерона обязательно даст и преимущество в спорте, характерное для мужчин. Но чтобы понять, как это повлияет на таких женщин, как Семеня, нам надо разобраться в работе их организма. Все женщины, которых касается тестостероновая политика ВА, интерсексуальны и имеют схожие черты: у них хромосомный набор XY, но их организм реагирует на андрогены не так, как у большинства людей с такими хромосомами. Поскольку гормоны действуют достаточно сложным образом, чрезвычайно трудно определить, каким именно будет влияние тестостерона на интерсексуальных людей.

Даже если бы андрогены влияли на них совершенно так же, связь между тестостероном и спортивными способностями была бы значительно слабее, чем может показаться. Тестостерон, поступающий в организм извне, действительно может дать кому-то дополнительные мышцы, но это еще не значит, что человек с более высоким уровнем тестостерона от природы будет успешнее в спорте, чем тот, у кого уровень тестостерона ниже. Даже исходная, подвергшаяся критике версия исследования Бермона указывает лишь на слабую связь: хотя для нескольких видов

соревнований тестостерон оказал положительное воздействие на спортивные способности, для 16 других никакого эффекта не обнаружилось. Кроме того, было показано, что более высокие уровни тестостерона в некоторых случаях могут быть связаны с худшими результатами.

В работе, где изучали шведских спортсменов с высшими достижениями, не было обнаружено связи между тестостероном и спортивными успехами, а недавнее исследование австралийских подростков показало сильную отрицательную корреляцию между уровнем тестостерона у девушек-спортсменок и их достижениями. Мужчины тоже не всегда получают явное преимущество от высокого уровня тестостерона: в одном исследовании почти у 17% мужчин из большого спорта уровень тестостерона был ниже типичного для их пола, а почти у 10% из них уровень тестостерона был ниже 5 нмоль/л.

В результате исследования выяснилось, что женщины, получавшие высокие уровни тестостерона, демонстрировали умеренный рост мышечной массы и резкое увеличение физической силы

Явное влияние на организм вводимого извне тестостерона и различие средней мышечной массы у мужчин и женщин наводят на мысль, что более высокие уровни тестостерона автоматически обеспечивают лучшие спортивные способности независимо от других факторов. Однако исследования показывают, что связь между тестостероном и спортивными достижениями, по крайней мере в большом спорте, не столь однозначна.

Знакомясь с наукой о поле и гендере, человек почти сразу понимает, что отделить биологическое от социального очень трудно. Для меня эта проблема стала очевидной, когда я изучала особенности ориентирования в пространстве, предположительно связанные с полом. Поскольку у мужчин по сравнению с женщинами, как правило, выше уровень тестостерона и они получают больше поддержки в изучении естественно-научных и технических дисциплин, сложно определить, обусловлены ли различия в способностях биологическими или

социальными причинами. Чтобы ответить на эти вопросы, исследователи изучают женщин с интерсексуальными чертами, имеющих высокий уровень тестостерона, но не получающих тех социальных воздействий, которые обычно получает мужчина. Анализируя их поведение, можно разделить влияние биологических причин и социальных.

Ситуация оказывается еще более запутанной, когда мы пытаемся не только отделить биологические факторы от социальных, но и посмотреть, как они взаимодействуют друг с другом. Очень интересна работа нейробиолога Мелиссы Хайнс (Melissa Hines). Она изучала девочек с врожденной гиперплазией надпочечников, заболеванием, при котором у женщин с хромосомами XX из-за необычно высокого уровня андрогенов возникают интерсексуальные черты. Хайнс показала, что такие девочки склонны к грубым мальчишеским играм. Недавно, однако, она обнаружила, что они вовсе не обязательно предпочитают мальчишеские игры куклам, им просто неважно, чем заняты другие девочки. Большинство маленьких девочек предпочитают играть с красным мячиком, а не с синим, если увидят, что другие девочки играют только с красными мячами, но девочки с врожденной гиперплазией надпочечников будут с удовольствием играть с любой из игрушек. Тестостерон не делает девочек более склонными к грубым играм, чем к чтению, он просто меняет их чувствительность к социальным сигналам, касающимся гендера.

Тестостерон влияет на поведение весьма сложным образом: он, видимо, действует вместе с социальными сигналами, так что эти факторы нельзя отделить один от другого. Хотя такие психологические наблюдения могут и не иметь отношения к вопросу о спортивных способностях, даже Бермон с коллегами предположили, что доминантность и агрессивность, долгое время ассоциирующиеся с уровнем тестостерона, могут влиять на победу в соревнованиях. В исследовании, где систематически изучали влияние приема тестостерона на женские физические способности, те женщины, кто получал высокие уровни гормона, демонстрировали умеренный рост мышечной массы и резкое увеличение физической силы. Исследователи предположили, что какой-то неучтенный психологический фактор позволяет их чуть более развитым мышцам достигать выдающихся спортивных результатов.

Однако было бы чрезмерным упрощением считать, что тестостерон вызывает агрессию или желание конкурировать, хотя женщины

с большей вероятностью вступают в конкуренцию, если их уровень тестостерона выше, а мужчины с более сильной реакцией на андрогены при конкуренции будут более уверены в своих шансах. На самом деле в многочисленных исследованиях показано, что уровень тестостерона повышается не до того, как человек выиграл соревнование или другим способом проявил доминирование, а уже после. А в одном исследовании 2005 г. показано, что этот эффект, по-видимому, у женщин выражен сильнее, чем у мужчин. Социальные нормы в отношении мужчин и женщин влияют на поведение, которое в свою очередь напрямую влияет на уровень гормонов, что еще раз свидетельствует о сложности взаимоотношений между биологическим и социальным и, вероятно, их неотделимости друг от друга.

Когда критики утверждают, что интерсексуальные женщины — это, по сути, «биологические мужчины», только с клитором и половыми губами, они полностью игнорируют то сильнейшее влияние, которое принадлежит к категории «мужчины» или «женщины» оказывает на всю нашу жизнь и на наше тело. Тестостерон — это не нечто таинственное, возникающее ниоткуда и сильнейшим образом действующее на наши тело и разум; уровень этого гормона зависит от гендерных норм, но одновременно и влияет на них.

Хотя тестостерон — всего лишь один из элементов в запутанной, порой даже циклической сети факторов, влияющих на спортивные способности, неправильно считать, что он не важен. Почему-то женщины с хромосомами XY оказываются более способными к выдающимся физическим достижениям, чем женщины XX. Из этого наблюдения, однако, не следует, что интерсексуальные женщины должны выступать вместе с мужчинами, конкурируя с ними там, где заведомо проиграют. Позиция же Международной ассоциации легкоатлетических федераций подразумевает, что деление спортсменов по критерию 5 нмоль тестостерона на 1 л крови биологически обоснованно и позволяет справедливо распределить людей по двум равным конкурентоспособным группам.

Поскольку тестостерон влияет на спортивные способности сложным нелинейным образом, такое предположение не подтверждается доказательствами. Было бы гораздо разумнее ввести в баскетболе разделение по росту: сейчас в Национальной баскетбольной ассоциации нет ни одного игрока ниже 180 см, тогда как и мужчины с низким уровнем тестостерона, и женщины с низким уровнем тестостерона могут быть чрезвычайно успешными

спортсменами. Нет также и никаких убедительных оснований считать, что интерсексуальность дает генетически обусловленные преимущества в большом спорте, где успехи могут способствовать самые разные нестандартные особенности организма. Почему пловец Майкл Фелпс, в организме которого образуется необычно мало молочной кислоты (что позволяет мышцам не утомляться), или баскетболист Мануте Бол, обладающий выдающимся ростом, должны быть вознаграждены, а Семья с повышенным уровнем тестостерона — дисквалифицирована?

Если биология не позволяет однозначно отнести спортсмена к одной из двух разных категорий, непонятно, почему у нас вообще есть разделение на мужчин и женщин. Хотя по уровню тестостерона человечество нельзя четко разделить на сильных и слабых спортсменов, в большом спорте, например в беге, мужчины достигают лучших результатов, чем женщины. Сделать соревнования общими и таким образом фактически лишить женщин шансов участвовать в Олимпийских играх на самом деле было бы не так уж несправедливо: в конце концов, многие группы людей, например люди с сердечно-сосудистыми заболеваниями, не могут и мечтать о большом спорте. Но это было бы прискорбно. Тогда мы потеряли бы таких выдающихся спортсменок, как спринтер Эллисон Феликс, пловчиха Кэти Ледеки и великолепная женская футбольная команда США, а все эти люди вдохновляют множество молодых женщин.

Разделить спортсменов исключительно по биологическим признакам не получается, но биология помогает нам лучше понять естественные человеческие вариации. В такой запутанной и противоречивой теме, как пол и гендер, наука зачастую обнаруживает больше вопросов, чем дает ответов. И если наука не предоставляет готового решения в случае интерсексуальных спортсменок, мы можем вспомнить о важности разнообразия, инклюзии и принятия — ведь именно благодаря этому женский спорт так замечателен. ■

Перевод: М.С. Багоцкая

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Naturally Occurring High Testosterone Shouldn't Keep Female Athletes out of Competition. The Editors; August 2016, <https://www.scientificamerican.com/article/naturally-occurring-high-testosterone-shouldn-t-keep-female-athletes-out-of-competition>

ПОВЕДЕНИЕ ЖИВОТНЫХ

Нападение ТВОРЦА

Изумрудная оса —
непреходящий кошмар
американских тараканов

Кеннет Катанья





ЗОМБИ

Изумрудная тараканья оса атакует американского таракана, решив превратить его в живой источник пищи для своей личинки

ОБ АВТОРЕ

Кеннет Катанья (Kenneth C. Catania) — профессор биологии в Университете Вандербильта. Изучает сравнительную нейробиологию, акцентируя внимание на сенсорных системах животных. Его последняя книга называется «Великие адаптации» (*Great Adaptations*, 2020).



еужели же до сих пор непонятно, с кем вы имеете дело? Идеальный организм! Его структурное совершенство сравнимо лишь с его враждебностью. Я восхищаюсь его чистотой! Существо, напроць лишенное совести, раскаяний или моральных иллюзий». Так андроид Эш описывает инопланетного монстра в фантастическом фильме ужасов «Чужой» (1979) режиссера Ридли Скотта, повествующем о некоем инопланетном существе. Оно прикрепляется к физиономии какого-нибудь члена экипажа космического корабля «Ностромо» и имплантирует в его тело эмбрион, впоследствии вырывающийся на свет из груди выносившего его человека.

Этот фильм надолго стал богатым источником кошмаров для целого поколения фанатов научной фантастики. Используя биологическую терминологию, можно сказать, что Чужие — это паразитоиды, то есть организмы, которые живут за счет своих хозяев, но в отличие от паразитов в конце концов убивают их. Никто из тех, кто посмотрел фильм, никогда не забудет процесс воспроизводства этих существ — даже если и постарается сделать это.

Признаюсь, восхищение паразитоидами не обошло стороной и вашего покорного слугу. Но не судите меня слишком строго! В моем случае речь идет не о каких-то чудовищах из космоса, а о самых обычных существах, широко распространенных на нашей родной планете, — изумрудных тараканьих осах (*Ampulex compressa*), которые зомбируют и в конечном итоге уничтожают американских тараканов.

Моя специальность — нейробиология. Каждую осень я читаю студентам Университета Вандербильта курс лекций о работе мозга и поведении животных. На Хеллоуин мне нравится «угощать» своих слушателей

каким-нибудь жутковатым примером из области биологии — популярный мнемонический прием, облегчающий запоминание учебного материала. Впервые узнав о жизни изумрудной тараканьей осы, я был настолько заинтригован повадками этого насекомого, что принес несколько особей в свою лабораторию, чтобы воочию наблюдать за их поведением. Вначале я просто хотел сделать видеоролики о повадках тараканьей осы и продемонстрировать их студентам, но вскоре с удивлением обнаружил, что мало-помалу всерьез увлекся изучением этого поразительного существа. Изумрудная тараканья оса уже давно известна ученым в качестве типичного паразитоида, но благодаря исследованиям, проведенным за последние несколько лет, я понял, что ее поведение гораздо сложнее, чем считалось прежде. Попутно выяснилось также, что более сложным поведением обладают и жертвы осы — тараканы.

Зомбирующее жало

Прежде чем приступить к рассказу о своих открытиях, заставивших меня восхищаться этим крошечным существом, нелишне

объяснить, благодаря чему оно обратило на себя внимание ученых. Чтобы оставить после себя потомство, самка осы должна найти хозяина, который будет обеспечивать пищей ее детеныша (личинку). Как и многие другие виды насекомых-паразитоидов, изумрудная оса использует в качестве источника пищи лишь представителей определенного вида животных — в данном случае таракана американского (*Periplaneta americana*). Это одна из причин, почему изумрудная оса пользуется такой популярностью даже среди людей, ненавидящих насекомых: как гласит пословица, враг моего врага — мой друг.

У биологов, однако, изумрудная оса вызывает интерес благодаря замечательной стратегии «зомбирования» жертвы. Фредерик Либерсат (Frederic Libersat) и его сотрудники из израильского Университета Бен-Гуриона в Негеве совместно с токсикологом Майклом Адамсом (Michael Adams) из Калифорнийского университета в Риверсайде провели серию изящных экспериментов, в которых обнаружили факты, сравнимые разве что с вымыслами научных фантастов.

Все начинается с роковой встречи самки осы с несчастным тараканом.

Атака жертвы совершается с невероятной точностью. Чтобы парализовать насекомое, которым впоследствии будет питаться ее личинка, оса действует как опытный нейрохирург. Первым делом она жалит жертву в особый отдел центральной нервной системы, называемый первым грудным ганглием. В этой структуре находятся моторные (двигательные) нейроны, контролирующие движения передних ног таракана. Яд осы содержит гамма-аминомасляную кислоту (ГАМК) — тормозной нейротрансмиттер, отключающий моторные нейроны и на какое-то время парализующий ноги насекомого. Эта первая «хирургическая операция» лишает таракана способности защитить голову от следующего укула жала, который оса наносит прямо в мозг жертвы. Впрыскивание второй дозы яда превращает таракана из отчаянно сопротивляющегося и опасного противника в крошечное, послушное существо, то есть в зомби.

Далее следует предсказуемая череда событий, завершающаяся гибелью таракана. Яд, введенный жалом в мозг жертвы, содержит нейротрансмиттер дофамин, и таракан вместо того, чтобы сломя голову спасаться бегством, как ни в чем не бывало принимает себя чистить себе ноги и усики. А оса тем временем отправляется на поиски «склепа», где она похоронит таракана вместе с отложенным на него яйцом. Подыскав подходящее

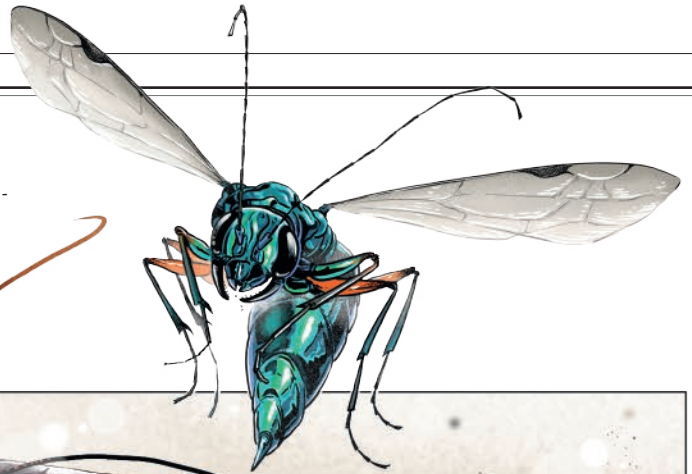


Личинка изумрудной осы поедает таракана изнутри (1), а превратившись во взрослую осу, вылезает из его шкурки (2)

укрытие, она возвращается к жертве и совершает действие, достойное самого крутого фильма ужасов. Сначала она откусывает один усик таракана, оставляя от него на голове жертвы лишь короткий кровотокающий «пенек». Затем она проделывает то же самое с другой антенной и начинает пить сочащуюся из «пеньков» тараканью кровь. Глядя на эту сцену, можно подумать, что, насыщаясь кровяной жидкостью жертвы, оса восполняет запасы энергии и питательных веществ, израсходованные во время изнурительной схватки с противником. После этого оса зажимает в челюстях один из «пеньков» и, пятясь задом, тащит таракана за собой. Таракан бредет, как собака на поводке. Оказавшись внутри «гробницы», оса откладывает крошечное клейкое яичко на одну из пары средних ног таракана. Затем она вылезает из норки и тщательно закупоривает ее вход лежащим поблизости растительным мусором.

Оса и таракан

Биологи прекрасно знают изумрудную тараканью осу благодаря ее изощренным манипуляциям с нервной системой американского таракана, которые превращают насекомое-жертву в живой источник пищи для развивающейся осиной личинки. Как показали недавние исследования, во время зомбирования таракана оса прибегает к гораздо более хитроумной тактике, чем считалось прежде.



Самка изумрудной осы готова к размножению. Но для этого ей нужно найти хозяина для своей личинки — американского таракана.

Встречу осы с тараканом ученые впервые наблюдали несколько десятилетий назад и считали ее хорошо изученной.

Оса жалит таракана, парализует его.



Конвоирование зомбированного таракана в «гробницу».



Откладывание яйца на послушного хозяина и закупорка входа в «склеп».



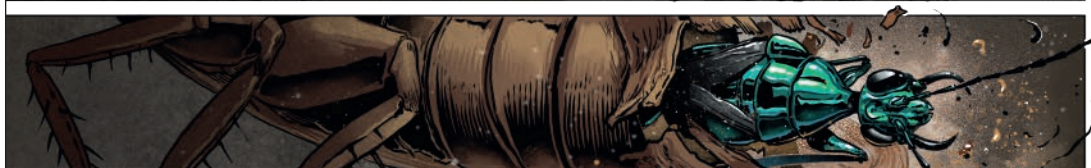
Вылупившаяся личинка внедряется в тело таракана.

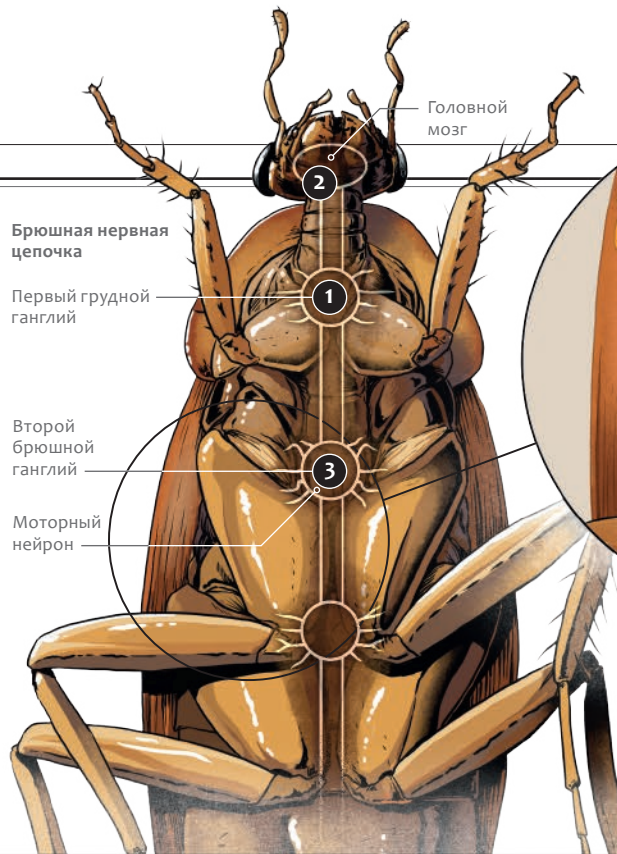


Личинка питается тканями таракана, а затем окукливается в коконе.



Примерно через 40–60 дней из шкурки таракана победоносно выбирается молодая оса.



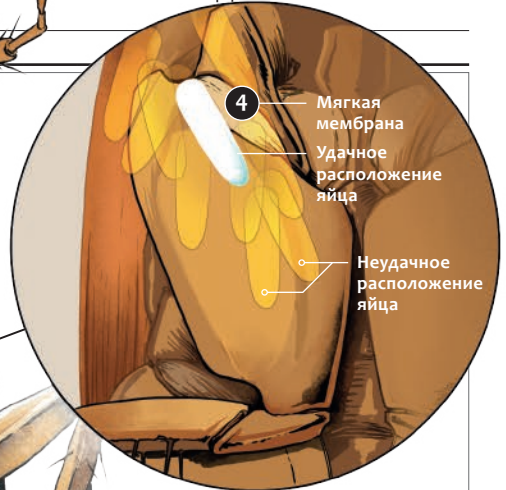


Как показали предыдущие исследования, во время атаки оса жалит таракана дважды.

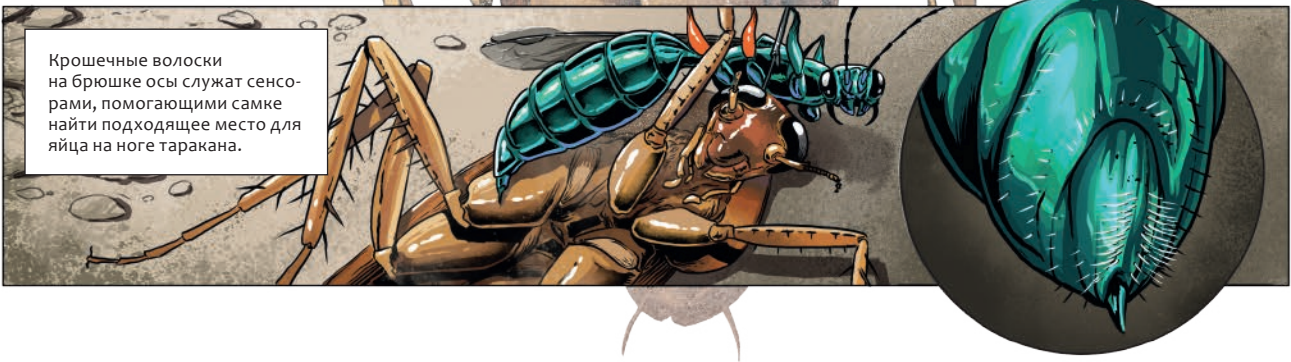
Сначала она наносит укол в отдел центральной нервной системы, называемый первым грудным ганглием **1**, парализуя передние ноги, а затем второй раз жалит — прямо в мозг насекомого **2**, превращая его в «зомби».

Недавние исследования показали, что этим дело не ограничивается.

Перед откладыванием яйца оса жалит таракана в другой отдел центральной нервной системы, называемый вторым грудным ганглием **3**. Это ужаление активирует моторные нейроны, что вызывает распрямление средней пары ног, где и находится подходящее место для откладывания яйца.



Удачное расположение отложенного яйца — жизненно важное условие для выживания личинки. Поскольку вылупившаяся личинка совершенно беспомощна, она должна быстро найти «слабое место» в броне таракана — мягкую мембрану в области сустава средней ноги **4**, которую она сможет прогрызть, чтобы проникнуть в тело хозяина.



Защитная стратегия таракана проста — не подпустить осу слишком близко к телу.

Он внимательно отслеживает перемещения осы с помощью чувствительных антенн.

И умело использует в своих интересах крупные размеры тела и силу колющих ног.



Таракан уклоняется от челюстей осы.

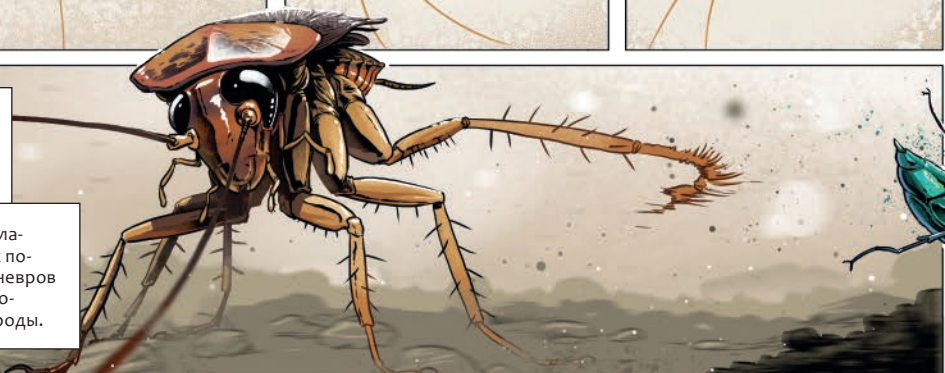


Смахивает осу резким движением ноги.



Таракан выпрямляет ноги и высоко поднимает тело. В нужный момент он наносит осе мощный удар ногой по голове.

Таракан, славящийся высокой пластичностью поведения, может с помощью нескольких простых маневров отбиться от одного из самых изощренных хищников в мире природы.





Некоторые тараканы, заметив изумрудную осу, готовятся дать ей отпор и принимают удобную для обороны стойку, становясь похожими в такой позе на фехтовальщиков

Как могла в процессе эволюции возникнуть такая сложная цепочка действий? Для любого хищника выслеживание, поимка и умерщвление жертвы — тяжелый труд. А перед изумрудной осой стоит еще более сложная задача — поимка подходящего животного и превращение его в пленника, который к тому же мог бы служить источником свежего корма для вылупившейся из яйца личинки. Для этого изумрудная оса должна впрыснуть яд в две крошечные нервные структуры, находящиеся внутри закованного в хитиновую броню тела насекомого, для которого бегство — главный способ защиты от опасностей. Ни одно из известных науке животных не способно столь тонко и изощренно манипулировать нервной системой другого животного, как изумрудная оса. Но это еще не финал!

Материнская забота

Когда речь заходит о событиях, происходящих в тараканьей «гробнице» после ее закупоривания самкой осы, сообщить какие-либо подробности не могут даже специалисты, изучающие этих насекомых. Предполагается, что из отложенного осой крошечного яйца вылупляется личинка, которая затем прогрызает наружные покровы таракана, внедряется в его тело и начинает заживо поедать его изнутри. А через некоторое время личинка, превратившись во взрослую осу, триумфально выбирается из пустой шкурки съеденной ею жертвы.

На самом же деле жизнь осиной личинки складывается так удачно далеко не всегда. Об этом мне довелось случайно узнать, когда из-за необходимости заниматься другими проектами я на некоторое время оставил

свою колонию ос на произвол судьбы и она едва не вымерла. Тогда мне пришлось тщательно осматривать каждую личинку в надежде, что в конечном итоге я получу достаточно много ос для возрождения колонии. Колония уцелела, но из этого горького урока я узнал, что маленькая мягкотелая личинка осы на самом деле крайне уязвима. В отличие от невероятно проворных «лицехватов» в фильме «Чужой» личинки изумрудной осы ползают очень медленно и после вылупления способны прогрызть лишь мягкую мембрану, находящуюся на теле таракана в строго определенных местах. Если личинка промахнется мимо этой цели хотя бы на долю миллиметра, она погибнет от истощения — к великой радости таракана, который примерно через неделю после укуса осы полностью придет в норму.

Уязвимость личинки возлагает огромную ответственность на самку осы: чтобы обеспечить выживание детеныша, она должна отложить и прикрепить яйцо к телу таракана в строго определенном месте. Как это делает оса? Для выяснения данного вопроса я перевернул микроскоп вверх тормашками и привинтил его к столу, а затем обустроил камеру с прозрачным дном, которая должна была служить «гробницей» для жертвы осы. Такая конструкция позволила мне запечатлеть на камеру крупным планом весь процесс откладывания яйца. На видео зафиксировано, с какой тщательностью оса прощупывает ногу таракана кончиком своего брюшка, прежде чем отложить яйцо в непосредственной близости от тонкого места в хитиновом панцире таракана. (Тело тараканов, как и всех насекомых, снаружи защищено жестким экзоскелетом, но в области суставов эта

броня отсутствует.) Рассматривая кончик осиною брюшка с помощью сканирующего электронного микроскопа, я обнаружил, что он покрыт множеством крошечных волосков. А не служат ли эти волоски своего рода сенсорами, помогающими осе отыскивать подходящее место для откладывания яйца?

Для проверки этого предположения я анестезировал осу и состригал волоски с кончика их брюшка. Во время этой простенькой, но невероятно тонкой операции мне пришлось комично удерживать сонную, но рассерженную осу двумя голыми пальцами и сверхострым обсидиановым скальпелем осторожно сбрасывать волоски с ее брюшка. Результаты эксперимента подтвердили мои подозрения: безволосые самки ос не могли отыскать подходящее место для откладывания яйца. Таким образом, мне удалось не только обнаружить главный «прибор», используемый осами при откладывании яиц, но и подтвердить жизненную важность размещения их в строго определенном месте: личинки, вылуплявшиеся в неправильных местах, обычно погибали от истощения, так как не могли отыскать брешь в тараканьей броне.

Случайное открытие

Изучая сенсорные волоски и выживание личинок, я неожиданно обнаружил еще один удивительный факт. Прежде чем оса отыскивала подходящее место для откладывания яйца, она вытягивала кончик брюшка и несколько раз прикасалась им к точке на брюшке таракана, расположенной на его средней линии немного впереди от места прикрепления к телу средней пары ног. В ответ таракан, как правило, распрямлял одну среднюю ногу — на той стороне тела, где находилась оса.

Вначале объяснить такое поведение я не мог. Казалось, осе просто захотелось немного отдохнуть — отвлечься от ответственной миссии по откладыванию яйца и заняться более приятными делами. В конце концов, однако, я решил повнимательнее присмотреться к этому необычному поведению осы при более сильном увеличении микроскопа. Каково же было мое удивление, когда я понял, что оса не просто ползает по таракану, «ощупывая» его брюшко. Я увидел, как под полупрозрачной шкуркой его тела расправляется осиное жало! Как это понимать? Ведь все биологи, изучающие изумрудных ос, отлично знают, что они жалят тараканов только дважды — сначала в первый грудной ганглий, чтобы парализовать передние ноги, второй раз — в мозг, чтобы зомбировать жертву. А может,

все дело в том, что мне просто попала какая-то ненормальная оса с неадекватным поведением?

Я решил продолжить свои наблюдения, немного изменив угол видеосъемки. Вскоре выяснилось, что, прежде чем отложить яйца, каждая самка изумрудной осы три раза жалит таракана в так называемый базистернум — особую область его хитиновой брони, расположенную непосредственно над вторым грудным ганглием (еще одним отделом центральной нервной системы насекомого). Напомню, первым укусом жала оса поражает первый грудной ганглий таракана, парализуя тем самым его передние ноги во время первоначальной атаки. Как можно догадаться, второй грудной ганглий содержит нейроны, управляющие работой второй (средней) пары его ног, на одну из которых оса и отложит яйцо. До меня наконец-то дошло, что замеченное мною необычное разгибание тараканьей ноги происходило в течение нескольких секунд после ужаления осой второго грудного ганглия. Казалось, укол жала в эту структуру каким-то образом заставляет таракана двигать ногой. А не представляют ли собой эти действия осы одно из звеньев процесса, благодаря которому она устанавливает контроль над поведением таракана?

Вполне, казалось бы, логичное предположение, но как доказать, что жало и в самом деле поражало второй грудной ганглий? Тем же самым вопросом ученые задавались в свое время и по поводу ужаления осой первого грудного ганглия таракана. Последовавшим затем длительным дебатам положил конец Либерсат, раз и навсегда разрешивший эту загадку с помощью остроумного подхода. Ученый сделал осу и, следовательно, яд ее жала радиоактивными. А после ужаления радиоактивным стал и первый грудной ганглий таракана.

Признаюсь, что ни превращать осу в радиоактивных существ, ни возиться с бумагами, необходимыми для получения разрешения на такую работу, особого желания у меня не было. К счастью, существовал более простой и удобный способ определить место ужаления осой жертвы. А потому я анестезировал таракана и вырезал в его покровах маленькое окошко, через которое был хорошо виден нервный ганглий. Затем я усилил увеличение микроскопа и стал наблюдать, как оса жалит свою жертву. Было отчетливо видно, как жало нанесло укол прямо в ганглий — причем в ту его сторону, которая контролировала работу ноги, куда оса позднее отложит яйцо. Совершенно ясно, что во время этих последних

ужалений осиный яд должен содержать компонент, активирующий моторные нейроны во втором грудном ганглии таракана, ответственные за распрямление ноги.

Но зачем в процессе эволюции должно было возникнуть такое высокоспециализированное поведение осы? Иными словами, как распрямление тараканьей ноги может способствовать ее репродукции? Теперь ответ на этот вопрос был для меня очевиден. Когда средняя нога таракана согнута, оса не может полностью обследовать ее поверхность сенсорными волосками, чтобы найти подходящее место для откладывания яйца, через которое появившаяся на свет личинка смогла бы проникнуть внутрь тараканьего тела. Активируя нейронную цепочку, ответственную за выпрямление ноги, оса устраняет последний барьер, который смог бы защитить таракана от ужасной судьбы. Пока неизвестно, каким образом яд вызывает эту реакцию, но мы знаем, что активацию нейронов-мишеней, скорее всего, опосредует ацетилхолин. Этот нейротрансмиттер, содержащийся в яде многих видов ос, вполне способен активировать моторные нейроны насекомых и вызывать распрямление их ног. Но чтобы подтвердить правильность такого простого объяснения или проверить гипотезу о возможном участии какого-то другого компонента яда, необходимы дополнительные исследования.

Теперь-то, надеюсь, вам стало понятно мое восхищение изумрудной осой. Это маленькое существо освоило такое поведение и научилось вырабатывать такой яд, благодаря которым оно может последовательно и целенаправленно воздействовать на три крошечные структуры нервной системы таракана. Каждый укол жала вызывает особый эффект, и каждый из них позволяет осе подчинить жертву своей воле, в конечном итоге полностью предоставляя обычно неуловимого и опасного таракана в безраздельное пользование крошечной нежной личинке. Таким образом, для таракана, похоже, встреча с осой означает неотвратимую гибель. Но так ли это на самом деле?

Боевая стойка

До сих пор речь шла о том, как оса с помощью нескольких укусов жала в центральную нервную систему таракана одерживает верх над своей жертвой. Если таракан застигнут врасплох или пускается в бегство, результат такой встречи представляется однозначным. В этих случаях оса либо тут же схватывает таракана, либо преследует его, а перегнать

летающую осу таракан не способен. Как только челюсти осы смыкаются на теле жертвы, обычно в течение первой же секунды она жалит ее в первый раз, парализуя передние ноги, — и продолжение этой мрачной истории вам уже известно.

Но среди тараканов попадаются и неординарные личности. Эти насекомые всегда осмотрительны, никогда не теряют бдительности и с помощью своих длинных антенн способны улавливать малейшие признаки надвигающейся опасности. При приближении осы такие тараканы не убегают. Вместо этого они готовятся к схватке, распрямляя свои длинные, покрытые острыми шипами ноги и приподнимая на них туловище высоко над землей. В такой позе таракан сильно напоминает фехтовальщика, принявшего стойку *en garde* — позицию, удобную для отражения выпадов противника. При этом ноги таракана образуют настоящий частокот из шипов, не дающий осе добраться до его уязвимого туловища. Оса не сможет совершить первое ужаление до тех пор, пока не схватит таракана челюстями. Двое соперников кружат друг вокруг друга, то сближаясь, то расходясь. Оса часто делает выпады, но таракан, стараясь избежать ее челюстей, в эти мгновения приседает или отклоняет туловище, а затем вновь принимает исходную боевую стойку.

Однако во время наблюдения за этими схватками насекомых наибольшее изумление вызывали у меня мощные удары, которые таракан наносил осе своими колючими задними ногами. Удары нередко обрушивались прямо на голову врага и отбрасывали его с такой силой, что тот со всего маху врезался в какой-нибудь ближайший предмет. Очухавшись, оса быстро приводила себя в порядок и возобновляла нападение — по крайней мере после первого «нокдауна». Но если таракану удавалось нанести осе несколько сильных ударов, та обычно прекращала атаку и улетала восвояси. По-видимому, чтобы не превратиться в зомби и не вынашивать в своем теле «Чужих», тараканам приходится прибегать к той же самой стратегии, что и многим персонажам научной фантастики, — всегда быть настороже, не убежать от врага и целиться в голову атакующего. ■

Перевод: А.В. Щеглов

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

- Катанья К. Шок и трепет // ВМН, № 10, 2019.
- Катанья К. Прирожденные убийцы // ВМН, № 9, 2011.



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

ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

ДЕНЬ, // КОГДА // МУЗЫКА УМЕРЛА

Болотный ясень, из которого производят самые знаменитые гитары в мире, исчезает из-за наводнений и жука-древоточца

Приянка Рунвал



В классических гитарах Fender, таких как Telecaster "Toploader" 1959 г., используется древесина болотного ясеня



ОБ АВТОРЕ

Прианка Рунвал (Priyanka Runwal) — журналистка, пишущая о науке и экологии, живет в Нью-Йорке.



Проливные дожди в центральной части США и таяние снегов в северных районах бассейна реки Миссисипи каждую зиму и весну приводят к сильнейшим наводнениям на юге, в низменностях, где преобладают лиственные породы деревьев. Летом, когда паводковые воды отступают и почва высыхает, сюда прибывают лесозаготовительные бригады. Одна из их целей — болотный ясень. Эти деревья произрастают в болотистых районах и обладают низкоплотной древесиной, состоящей из тонкостенных ячеек с большими промежутками между ними. Отсюда и берется уникальный звук гитар, созданных из этой древесины, которым отдавали предпочтение звезды рок-н-ролла первой величины.

Знаменитый производитель гитар *Fender* стал использовать эту древесину еще в начале 1950-х гг. Блюзмен Мадди Уотерс, Кит Ричардс из *Rolling Stones*, Крисси Хайнд из *Pretenders* и десятки других легендарных исполнителей любят свои инструменты, созданные *Fender*. Многие говорят, что это дерево придает им теплый, кристально чистый звук. Болотный ясень иногда называют «музыкальным» или «панковским» ясенем. Чаще всего имеется в виду так называемый ясень пенсильванский (*Fraxinus pennsylvanica*, зеленый), но иногда подразумеваются и другие виды, растущие в низинах: черный (*Fraxinus nigra*) и белый (*Fraxinus ornus*) ясени. По словам Майка Борна (Mike Born), бывшего директора по древесным технологиям в *Fender*, за прошедшие десятилетия древесина стала частью ДНК этой компании, когда-то она была дешевой и доступной.

Но в прошлом году острый дефицит вынудил *Fender* объявить о намерении отказаться от использования болотного ясеня в своей знаменитой линейке гитар *Stratocaster* и *Telecaster*, оставив эту древесину только для дорогих винтажных моделей. *Fender* объяснил свое решение сокращением поставок и климатическими условиями, вызвавшими увеличение продолжительности неблагоприятного

для заготовок периода. Это в первую очередь связано с наводнениями в нижнем течении Миссисипи, которые угрожают саженцам и затрудняют лесозаготовительным компаниям доступ к деревьям, а также с надвигающейся угрозой со стороны жуков-древоточцев. Другой известный американский производитель, *Music Man*, выразил аналогичные опасения по поводу поставок древесины еще в 2019 г.: компания заявила об «одном из худших урожаев в новейшей истории».

Эта безрадостная ситуация лишней раз доказывает нам, что изменение климата может оказать влияние на все сферы нашей жизни — даже на рок-н-ролл. Запасы болотного ясеня вскоре могут стать еще более скудными, поскольку эксперты ожидают, что глобальное потепление приведет к усилению наводнений. «Обычный исполнитель просто не сможет позволить себе купить гитару» — говорит Борн.

Наводнение и нашествие

Болотный ясень, растущий в бассейне нижней Миссисипи, способен выдержать сезонные наводнения. Как только поймы становятся достаточно сухими, лесозаготовительные бригады отправляются на заготовку древесины. «Река возвращается в свои берега, и земля становится такой безопасной для тяжелой

лесозаготовительной техники, словно это парковка у супермаркета», — говорит Норман Дэвис (Norman Davis), бывший президент и нынешний советник компании *Anderson-Tully*, занимающейся лесозаготовкой в Виксберге, штат Миссисипи. По словам Дэвиса, компания была когда-то крупнейшим поставщиком болотного ясеня для *Fender*, однако усилившиеся в последнее время наводнения осложнили ситуацию. «Последние два с половиной года низины были в значительной степени недоступны», — говорит он.

По данным Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) США, 12 месяцев в период с июня 2018 г. по июль 2019 г. побили рекорд по уровню влажности в США. Весенние наводнения 2019 г. во многих районах бассейна Миссисипи были одними из самых разрушительных в современной истории. А исследование, опубликованное в 2018 г. журналом *Nature*, показало, что за последние 150 лет наводнения в этом районе стали более частыми и сильными. «Увеличение количества осадков — естественное следствие изменения климата. Растут объемы воды, попадающей в реку», — говорит Джеральд Галлоуэй (Gerald Galloway), эксперт по гидрологии Миссисипи и профессор гражданской и экологической инженерии в Мэрилендском университете в Колледж-Парке. А расширяющаяся система дамб, заградений и насыпей, изначально предназначенная для предотвращения наводнений, вместо этого может только ухудшить ситуацию.

Зеленый ясень — один из особо ценных и быстрорастущих видов болотных деревьев, приспособившийся к сезонным наводнениям. Но увеличение продолжительности периодов половодья не могло не повлиять и на этот вид, особенно на рассаду. «Непродолжительное наводнение, длящееся всего пару недель и приходящееся на начало вегетационного периода, — это не проблема для ясеня», — говорит Брэди Селф (Brady Self), специалист по лесному хозяйству лиственных пород в низинах из Службы распространения знаний Университета Миссисипи. Но эти деревья не приспособлены к тому, чтобы год за годом выдерживать длительные наводнения. «Если саженцы остаются под водой в течение нескольких месяцев, у них могут возникнуть проблемы с выживанием», — говорит Селф.



Наводнения в низинах Миссисипи поставили под угрозу болотные ясени (1). Их древесина, которую сейчас уже трудно найти, придает особые вид и звучание таким гитарам, как *Fender Telecaster*, которые производятся на заводе компании *Fender* (2).

Ли Джонс (Lee Jones) из компании *J.M. Jones*, более 100 лет занимающейся лесозаготовкой в Натчезе, штат Миссисипи, свидетельствует об ущербе, который приносят наводнения: «Много деревьев погибло, слишком долго продержалась вода в реке».

Другая угроза — ясеневая изумрудная узкотелая златка (*Agrilus planipennis*). Этот инвазивный жук родом из Восточной Азии. Его личинки прокладывают ходы в древесине и нарушают способность деревьев переносить воду и питательные вещества. С тех пор как этот жук был впервые обнаружен

в штате Мичиган в 2002 г., он распространился в 35 штатах США, в пяти провинциях Канады и убил миллионы местных ясеней. «Я думаю, что это самый быстрораспространяющийся древесный вредитель, которого мы видели в США», — говорит Дженнифер Кох (Jennifer Koch), биолог Лесной службы США.

Ясеньевая изумрудная узкотелая златка еще не достигла низовьев поймы Миссисипи, но Кох уверена, что «это лишь вопрос времени». Осознавая угрозу, несколько лесозаготовительных компаний начали вырубку всех взрослых болотных ясеней на выбранных в 2015 г. участках. В прежние годы они ограничивали вырубку лишь 30%. По словам Кох, это решение имеет смысл в нынешних обстоятельствах, но в долгосрочной перспективе приведет к снижению численности деревьев.

Возможно, в будущем меломанам придется довольствоваться лишь записью легендарного звучания гитары *Fender*, раз за разом прокручивая знаменитое соло в *Stairway to Heaven* Джимми Пейджа, которое он исполнил на своей гитаре *Dragon Telecaster*, сделанной из древесины болотного ясеня

Непростой выбор

Заявление компании *Fender* об отказе от древесины ясеня вызвало тревогу в гитарном мире. Для Ричи Коцена (Richie Kotzen), который несколько десятилетий назад прославился благодаря хард-рок-группам *Poison* и *Mr. Big*, последствия имеют личный характер. Фирменные модели гитар *Fender*, на которых он играет, изготавливались из болотного ясеня с 1990-х гг. Но теперь появятся инструменты из других пород дерева. «Много лет назад я решил, какая древесина мне больше всего нравится. Лучший вариант для меня — это

корпус из болотного ясеня и кленовый гриф. А теперь мне придется искать замену», — говорит он.

Вариантов несколько, в том числе красная ольха, произрастающая на западном побережье Северной Америки. С конца 1950-х гг. *Fender* использовал ольховую древесину для производства менее дорогих аналогов многих своих гитар из ясеня. Но многие поклонники считают, что светлый оттенок древесины ясеня и открытая текстура делают инструмент более красивым. Существуют и тонкие различия в тональности звука, которые отличают древесину ясеня от древесины ольхи. «У ясеня очень быстрая атака, ощущение такого прозрачного хлопка», — говорит Брайан Свердфегер (Brian Swerdfeger), вице-президент отдела гитарных исследований и разработок *Fender*. — У ольхи более теплая и мягкая атака. По-прежнему хлопок, но более округлый».

Дженнифер Кох и другие исследователи предпринимают попытки разводить различные виды ясеня (в том числе зеленый), которые могли бы противостоять вредителям и заменить постепенно исчезающий болотный ясень. На реализацию проекта уйдут десятилетия, но с учетом непрекращающихся климатических изменений проблемы с наводнениями в поймах вряд ли исчезнут. Эти вопросы беспокоят не только ученых, но и музыкантов. «Я могу адаптироваться к новому дереву», — говорит Коцен, — но меня гораздо больше беспокоит экологическая проблема».

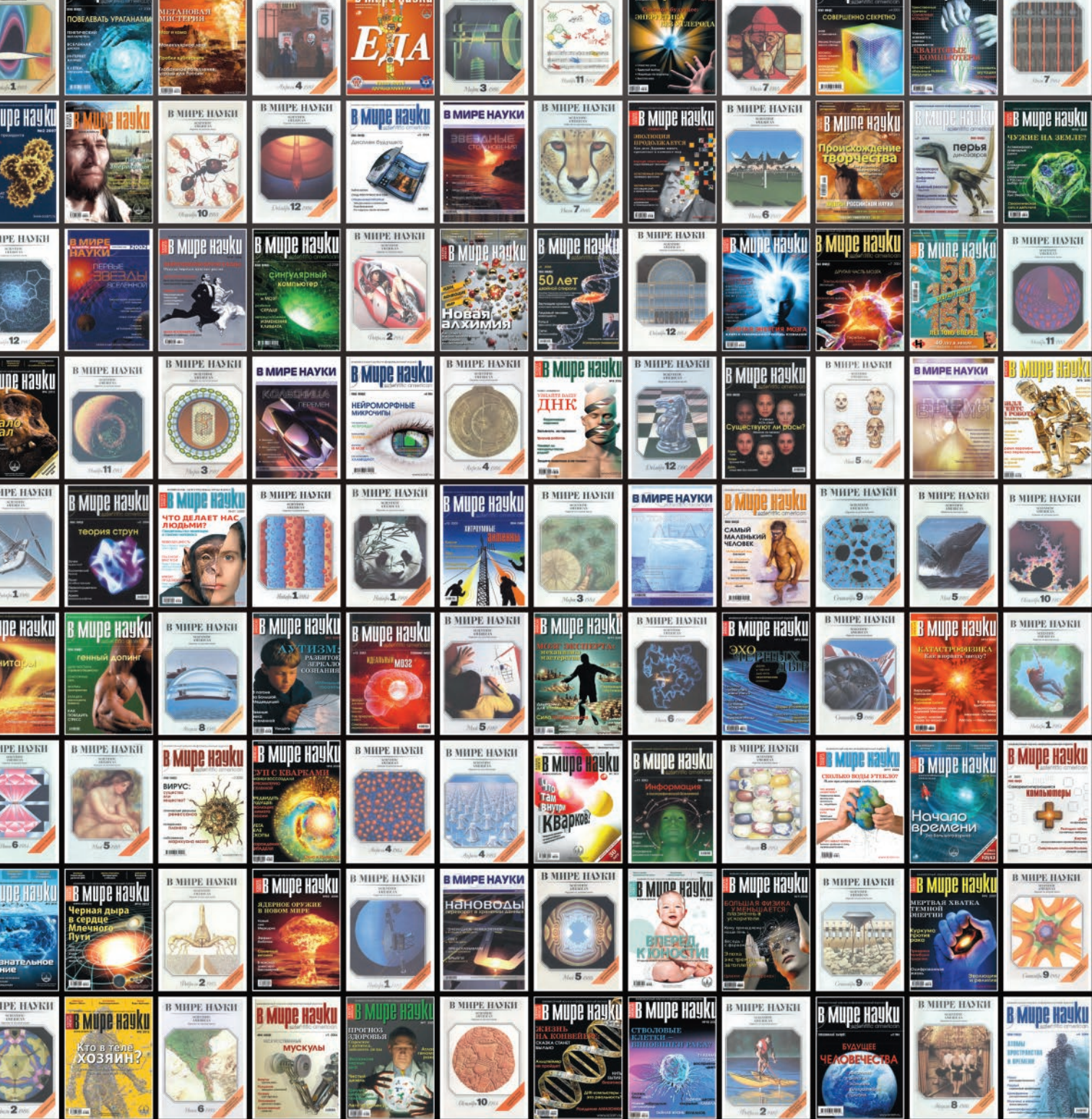
Лесозаготовительные бригады компаний *J.M. Jones* и *Anderson-Tully* прошлым летом вернулись в низины реки Миссисипи. Однако есть опасность, что в ближайшем будущем болотный ясень из этого региона станет дефицитным товаром. «Спрос велик, но я не думаю, что у нас будет достаточно панковского ясеня для продажи», — говорит Джонс. — Просто деревьев осталось не так много».

Поскольку будущим поколениям станет все труднее доставать ясеньевые гитары *Fender*, меломанам, возможно, придется довольствоваться лишь записью легендарного звучания, раз за разом прокручивая знаменитое соло в *Stairway to Heaven* Джимми Пейджа, которое он исполнил на своей гитаре *Dragon Telecaster*, сделанной из древесины болотного ясеня. ■

Перевод: Д.С. Хованский

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Качмент А. Конец апельсинового сока // ВМН, № 7-8, 2013.



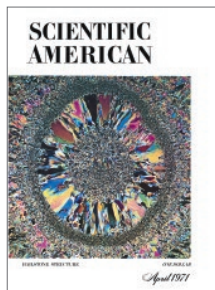
Хотите знать о науке больше?

Полный архив выпусков журнала
«В мире науки» — на сайте издания
по адресу: www.sciam.ru

В мире науки
SCIENTIFIC AMERICAN

Теперь можно купить
и отдельные статьи





АПРЕЛЬ 1971

Современное стекло. Изготовление высококачественного листового стекла посредством расплавления его над ванной с жидким оловом быстро заменяет традиционный процесс производства листового стекла в США. Производство листового стекла на расплаве металла,

разработанное в Англии около десяти лет назад компанией *Pilkington Bros.* и внедряемое в США компанией *PPC Industries*, позволило отказаться от механических операций шлифовки и полировки, выполняемых при традиционном методе изготовления. Следовательно, это значительно удешевляет весь процесс. При использовании технологии производства на расплаве олова стекло, покидая плавильную печь, течет горизонтально в ванну с расплавом — продолговатый резервуар длиной более 30 м и достаточной ширины, чтобы нести ленту стекла самого широкого стандартного коммерческого размера. Стеклоплавающая лента плывет по идеально ровной поверхности расплавленного олова.



АПРЕЛЬ 1921

Перемещение масс. На Центральном вокзале Нью-Йорка, в сердце Манхэттена, ежедневно обслуживается около 600 пассажирских поездов. Все они должны быть поданы на соответствующие пути вокзала с помощью стрелок и семафоров. Если бы давно устаревшая практика использования стрелочных переводных механизмов, обслуживаемых отдельными стрелочниками, все еще оставалась актуальной, для управления всеми стрелками потребовалось бы постоянное дежурство многих сотен человек. Нынешний метод управления стрелками, путевыми съездами и семафорами из центрального пункта, называемого блокировочной станцией, позволил контролировать все эти операции на обширной территории небольшому количеству людей во главе с диспетчерами.

использования стрелочных переводных механизмов, обслуживаемых отдельными стрелочниками, все еще оставалась актуальной, для управления всеми стрелками потребовалось бы постоянное дежурство многих сотен человек. Нынешний метод управления стрелками, путевыми съездами и семафорами из центрального пункта, называемого блокировочной станцией, позволил контролировать все эти операции на обширной территории небольшому количеству людей во главе с диспетчерами.



АПРЕЛЬ 1871

Консистенция Земли. Хотя представление о том, что Земля — расплавленная сфера, окруженная тонкой коркой твердого вещества, когда-то разделяли почти все геологи, в последние годы было выдвинуто несколько контраргументов в пользу того, что она вся

(или почти вся) представляет собой твердую массу.

In memoriam

Дэн Шленофф. С прискорбием сообщаем о смерти Дэна Шленоффа (Dan Schlenoff), редактора этой колонки на протяжении 20 лет. Дэн был историком, ему доставляло удовольствие изучать прошлое журнала *Scientific American* и делиться удивительными, пророческими, а иногда и странными историями, которые он находил в архивах. Он был добрым, веселым, любознательным и щедрым коллегой и другом, нам будет очень не хватать его. Признательность Дэну продолжает жить в наших сердцах. Мы будем хранить память о нем.



Возможно ли, чтобы такая тонкая корка оставалась твердой, а не растворилась сразу и не была поглощена гораздо большей массой расплавленного вещества под ней? Очевидно, что никакая корка не могла бы даже начать формироваться на поверхности, если бы сама сфера в то время не отдавала в окружающую атмосферу больше тепла, чем могла получить из своих расположенных ближе к центру частей.

Собаки-трудяги. Французские гвозди, пишет *Mechanics' Magazine*, производятся в Шарлевиле — частично на крупных фабриках с помощью машин, частично на множестве небольших фабрик, или даже в артелях, разбросанных по густонаселенным деревням. Эти деревни, и особенно одна из них, Неманиль, населены не только людьми, но и рабочими собаками. Задача этих собак заключается в обеспечении движения мехов, раздувающих горны мастеровских. Их помещают в колесо, и собаки крутят его, буквально как белки в колесе.

Сладкий бизнес.

Сушка винограда для производства изюма становится крупной отраслью в Калифорнии: высокая концентрация сахара в соке американского винограда делает его особенно пригодным для этой цели.

В доцифровую эпоху управлять движением поездов помогает электрическое оборудование, 1921 г.



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

Борьба за социальную справедливость

Black Lives Matter принимает эстафету от Движения за гражданские права.

Математика создания связей

Теория перколяции освещает поведение самых разных видов сетей — от мобильной телефонии до распространения заболеваний.

Иные луны

Продолжается гонка, цель которой — открыть первую луну, вращающуюся вокруг планеты за пределами нашей Солнечной системы.

Вид с обратной стороны Луны

Новые лунные телескопы будут заглядывать в темные века Вселенной, скрывающие зачатки звезд.

Как преодолеть пандемический стресс

Кризис, вызванный COVID-19, длится уже больше года, и это очень тяжело сказывается на психическом здоровье. Могут оказаться полезными способы борьбы со стрессом, используемые для терапии при катастрофах и травмах.



Происхождение дома

Город возрастом в 9 тыс. лет раскрывает секреты того, какой была наша жизнь на заре оседлости.

Полет фантазии

Палеонтолог и иллюстратор заставляют мифических существ следовать правилам биомеханики.



Последний бой темной материи

В новом эксперименте могут быть пойманы невидимые частицы, которые ускользали от предыдущих детекторов.



ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛ

Научная Россия



*Художница Екатерина Лебедева
«Разговор с Капицей»*



Взгляд на науку с пристрастием

Актуальная информация
о науке и технике в России
и в мире

Открытия в разных
областях фундаментальной
и прикладной науки

Новости из научных
центров и вузов страны
и мира

scientificrussia.ru