

# НАУКА **В мире**

Обзор журналов  
Nature, PNAS, Science

Номер 19 (2)  
25 февраля 2015 г.

«Планетарные границы» —  
зоны безопасного существования  
человечества на Земле

стр. 9

Российский высотный самолет  
М-55 «Геофизика» примет участие  
в европейском научном проекте

стр. 5

Астрономы запечатлели  
рождение четверной  
звездной системы

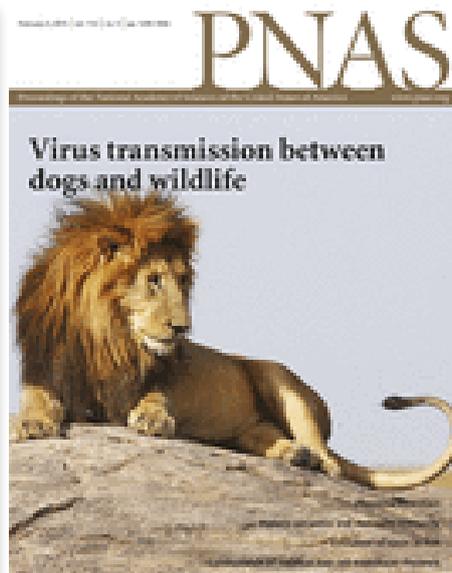
стр. 14

Диабетический  
препарат метформин  
помогает от рака

стр. 34

Найден самый древний  
предмет человеческого  
«искусства»

стр. 29



**ЖУРНАЛ «НАУКА В МИРЕ» № 19 (2)**

25 февраля 2015 года

Издается еженедельно

#### **УЧРЕДИТЕЛЬ**

Общероссийская общественная организация  
«Российская ассоциация содействия науке»

Свидетельство о регистрации СМИ:

Эл № ФС77-59570 от 10 октября 2014 года



#### **ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ПРЕЗИДИУМА RASCH**

**Евгений Павлович ВЕЛИХОВ,**

академик РАН, Почетный секретарь  
Общественной палаты РФ,  
президент НИЦ «Курчатовский институт»

#### **ПЛЕНУМ RASCH**

**Виктор Лазаревич АКСЕНОВ,**

директор Петербургского института  
ядерной физики им. Б.П. Константинова

**Жорес Иванович АЛФЕРОВ,**

академик РАН, вице-президент РАН,  
член Комитета Государственной Думы  
по науке и наукоемким технологиям

**Лев Яковлевич БОРКИН,**

член Президиума RASCH, почетный  
председатель Правления  
Санкт-Петербургского союза ученых

**Надежда Дмитриевна ВАВИЛИНА,**

член Президиума RASCH, доктор социологических  
наук, ректор Нового Сибирского университета

**Максим Валерьевич ВИКТОРОВ,**

первый заместитель председателя  
Президиума Российской ассоциации  
содействия науке, председатель  
Совета Фонда инвестиционных программ

**Олег Васильевич ИНШАКОВ,**

президент Волгоградского государственного  
университета

**Александр Николаевич КАНЬШИН,**

председатель Совета Национальной ассоциации  
объединений офицеров запаса  
Вооруженных Сил РФ

**Михаил Валентинович КОВАЛЬЧУК,**

член Президиума RASCH, член-корреспондент РАН,  
директор НИЦ «Курчатовский институт»

**Николай Александрович КОЛЧАНОВ,**

академик РАН, директор Института  
цитологии и генетики СО РАН

**Юрий Николаевич КУЛЬЧИН,**

академик РАН, директор Института автоматизации  
и процессов управления ДВО РАН

**Андрей Викторович ЛОГИНОВ,**

заместитель руководителя Аппарата Правительства РФ

**Георгий Владимирович МАЙЕР,**

Президент Национального исследовательского  
Томского государственного университета,  
член Совета Российского союза ректоров

**Вера Александровна МЫСИНА,**

старший научный сотрудник  
Института общей генетики РАН

**Валерий Александрович ТИШКОВ,**

академик РАН, директор Института этнологии  
и антропологии им. Н.Н. Миклухо-Маклая РАН

**Владимир Михайлович ФИЛИППОВ**

член Президиума RASCH, доктор физико-математических  
наук, академик РАО, ректор Российского университета  
дружбы народов

**Валерий Александрович ЧЕРЕШНЕВ,**

академик РАН, академик РАН,  
председатель Комитета Государственной Думы  
по науке и наукоемким технологиям,  
член Консультативного совета Фонда «Сколково»

**Татьяна Владимировна ЧЕРНИГОВСКАЯ**

член Президиума RASCH, доктор филологических наук,  
доктор биологических наук, профессор

#### **ИЗДАТЕЛЬ ЖУРНАЛА**

Медиагруппа «Вся Россия» (ООО «ВР Медиа Групп»)

#### **Генеральный директор, и. о. главного редактора**

Сергей Валерьевич КАЛМЫКОВ,  
руководитель Комиссии по информационной политике RASCH

#### **Административный директор**

Светлана Александровна ХОЗИНСКАЯ

#### **РЕДАКЦИЯ**

##### **Старший научный редактор реферативной части**

Владислав Владимирович СТРЕКОПЫТОВ

##### **Редакторы**

Владимир Федорович КУЗНЕЦОВ,  
Ирина Александровна БАННОВА

##### **Редакторы-референты**

Галимова Д. Р., Братцева А. Л., Ваганова А. Н.  
Дедков Г. В., Илларионова Н. Б., Карпов Н. В.,  
Колесникова Н. Ю., Корепанов А. П., Литвинова Т. А.,  
Мохосоев И. М., Стрекопытов В. В., Якименко А. В.

##### **Дизайнер-верстальщик**

Галина Олеговна НЕФЕДОВА

##### **Адрес редакции (для переписки):**

105066, г. Москва, ул. Спартаковская, 11-1.

e-mail: info@naukavmire.ru

сайт: www.naukavmire.ru

Информационная продукция для детей,  
достигших возраста двенадцати лет.

© ООО «ВР Медиа Групп». Все права защищены.  
Любое использование материалов допускается  
только с письменного разрешения редакции.

# Читайте в этом номере:

## Информационное поле

### 4 От редакции

Самое интересное в рефератах

*Топ-10 статей текущего номера*

### 5 Новости • В России

Российский высотный самолет примет участие в европейском научном проекте

Ледники Кавказа растают на 40% к 2050 году

### 6 Первый российский композитный 3D-принтер может превзойти мировые аналоги

### 7 Новости • За рубежом

Микрофлора организма – новый носитель наследственной информации

Американские ученые объявили о новой мощной вакцине против СПИДа

### 8 Жизнь на Земле появилась на 1,2 миллиарда лет раньше, чем считалось ранее

В Великобритании принят закон о «генномодифицированных» детях

### 9 Комментарий

«Планетарные границы» – зоны безопасного существования человечества на Земле

## Nature · PNAS · Science: рефераты статей

### 13 Естественные и точные науки

### 30 Медицинские науки и общественное здравоохранение

### 36 Техника и технологии

### 39 Социальные науки

### 41 Междисциплинарная тематика

# Самое интересное в рефератах

## Топ-10 статей текущего номера

- 1. Рождение четверной звездной системы.** Астрономы впервые смогли запечатлеть зарождение множественной звездной системы. Это уникальное событие произошло в газовой туманности Barnard 5 в созвездии Персея, на расстоянии примерно в 800 световых лет от Земли. Возможно, это позволит объяснить, почему некоторые уплотнения газового облака превращаются в одиночные звезды, а другие — в двойные или множественные звездные системы. *Реферат на с. 14.*
- 2. Коралловые рифы постепенно восстанавливаются.** Около 15 лет назад коралловые рифы во всем мире начали погибать. Масштабы гибели рифов были катастрофическими. В последние годы часть рифов начала восстанавливаться. Однако теперь коралловым полипам приходится конкурировать с водорослями, успевшими в период «коралловой катастрофы» занять их место. *С. 23.*
- 3. Подледные озера Гренландии то наполняются водой, то вновь опустошаются.** Уникальный «пульсирующий» режим субгляциальных озер связан с изменениями температуры и вязкости льда, вмещающих подледные резервуары. Ученые считают, что под ледниковым покровом Гренландии может находиться до 400 и более озер, собирающих талую воду с поверхности. Это целая субгляциальная гидросистема, связанная с супрагляциальной гидросистемой и влияющая на реологические свойства ледникового щита в целом. *С. 24.*
- 4. Радиоактивный шлейф Фукусимы достиг берегов Америки.** В результате аварии на АЭС Фукусима в Японии в 2011 г. в Тихий океан попали большие количества радиоактивного изотопа цезия  $^{134}\text{Cs}$ . К августу 2014 г. шлейф заражения добрался до западных берегов Канады и США. Тем не менее, ученые утверждают, что концентрации цезия в морской воде настолько низкие, что не представляют опасности ни для здоровья человека, ни для состояния окружающей среды. *С. 25.*
- 5. Магнитотаксисные бактерии и жизнь на Марсе.** Ученые научились отличать биогенный магнетит от абиогенного. Биомангнетит, образующийся в магнетосомах — специальных межклеточных органеллах магнитотаксисных бактерий, характеризуется высокой химической чистотой и практически лишен примесей. Такими же свойствами обладает и магнетит из марсианского метеорита ALH84001. *С. 26.*
- 6. Разнообразие мезозойских млекопитающих.** Когда-то считалось, что чуть ли ни все первые млекопитающие были мелкими, невзрачными и однообразными. Ископаемые остатки двух животных, найденные в Китае, показали, что юрские млекопитающие были разнообразнее, чем считалось до сих пор. Один из новых видов — напоминал крота и рыл ходы под землей. Второй — жил на деревьях и питался древесным соком, напоподобие современных лемуров и мармозеток. *С. 28.*
- 7. Питекантропы обладали образным мышлением.** Сенсационное открытие сделали ученые, изучая образцы из коллекции Эжена Дюбуа, открывшего в 1891 г. так называемого яванского человека — *Homo erectus*, жившего 500 тыс. лет назад. Выяснилось, что предки неандертальцев не только использовали хитроумные приемы и специальный инструмент для открывания раковин моллюсков, но и умели наносить рисунки на эти раковины. Обнаруженная раковина с гравировкой является древнейшим в мире произведением искусства. *С. 29.*
- 8. Диабетическое лекарство спасает от рака.** Миллионы диабетиков принимают препарат метформин уже десятки лет. В последнее время получены данные о противоопухолевых свойствах этого препарата. Оказалось, что действие метформина на опухолевое микроокружение опосредовано иммунной системой организма. *С. 34.*
- 9. Сверхпроводимость включается светом.** Группа японских ученых разработала новый тип полевого транзистора, работающего за счет эффекта сверхпроводимости, который может быть включен или выключен при помощи освещения некоторых элементов его структуры. Открытие может быть использовано для создания высокоскоростных переключателей, оптических датчиков и других устройств, где требуется быстродействующая коммуникация проходящего электрического тока. *С. 36.*
- 10. Светодиоды с антеннами могут вытеснить лазеры.** Американские ученые изобрели оптическую наноантенну, использование которой вместе со светодиодами в перспективе позволит отказаться от лазеров в оптических коммуникациях на небольшие расстояния, например, между микрочипами. Технология основана на применении спонтанного излучения, усиленного с помощью оптической антенны. *С. 37.*

## Российский высотный самолет примет участие в европейском научном проекте

Подписан контракт между ОАО «Экспериментальный машиностроительный завод им. В. М. Мясищева», входящее в ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация», и немецким институтом Альфреда Вегенера (Alfred Wegener Institute) (Потсдам, Германия) об использовании российского высотного самолета М-55 «Геофизика» в европейском научно-исследовательском проекте StratoClim по изучению атмосферы и климата Земли

Начало полетов в рамках проекта запланировано на январь 2016 года. Основные исследовательские полеты будут выполнены летом 2016 года в Индии.

«Наша машина способна летать на высоте до 21,5 км, нести до 2 тонн научного оборудования. Эти характеристики делают его незаменимым для изучения состава атмосферы, мирового климата, космоса, астрофизических и астрономических наблюдений, отработки спутниковой аппаратуры дистанционного зондирования», — отметил главный конструктор «ЭМЗ им. В. М. Мясищева».

«Мы создаем математическую модель земной атмосферы. С ее помощью мы сможем прогнозировать изменения климата на Земле через 20, 30, 50 лет. Для этого мы собираем данные в районах наиболее интенсивного перемещения воздушных масс — Арктике, Антарктиде, тропиках», — отметил руководитель научно-исследовательского проекта StratoClim, институт Forschungszentrum Juelich, Германия.

Во время экспедиции в Индию в 2016 году россиянам предстоит взаимодействовать с коллегами из 25 различных научных институтов и учреждений Европы. На самолете может устанавливаться до 30 различных приборов, масса которых от 12 до 398 кг. Самолет способен находиться в полете до шести часов.

Ранее М-55 «Геофизика» выполнял полеты над Арктикой, Антарктидой, континентальной частью Бразилии (район Арасатуба), Австралией и Африкой. Пилоты и ученые сделали ряд важных открытий, например, над Индийским океа-



Российский высотный самолет М-55 «Геофизика». Пресс-служба ОАО «ОАК»

ном зафиксировали рекордно низкую для атмосферы Земли температуру в минус 91,8°C.

Сегодня М-55 «Геофизика» — единственный в своем роде высотный самолет-разведчик, используемый в интересах всего мирового научного сообщества. Его прообраз М-17 создавался в СССР в рамках военного проекта, который был едва не закрыт, когда у военных нужда в нем пропала. Было принято решение на базе М-17 создавать высотный разведывательно-ударный комплекс, состоящий из собственно самолета-разведчика и наземного пункта наведения и управления, обеспечивающего целеуказание ракетам «земля-земля» и ударным самолетам. Модифицированный самолет М-17РМ выполнил первый полет 16 августа 1988 года. В ОКБ Мясищева самолет получил обозначение М-55 «Геофизика».

Обладая уникальными высотными характеристиками, планер самолета оказался способен нести практически любую из существовавших научных аппаратур, использовавшихся в авиации. «Геофизика» стала настоящим трансформером, способным эффективно работать с различными приборами для ведения конкретных исследований.

Научное оборудование, устанавливаемое на самолете, включает в свой состав мощные и маломощные лидары для обнаружения полярных стратосферных облаков и аэрозолей, спектрометры для проведения дистанционного анализа химического состава атмосферы, а также комплекс аппаратуры, предназначенный для проведения измерений основных метеорологических параметров атмосферы на различных высотах в нижней стратосфере и тропосфере. Самолет может использоваться и для дистанционного зондирования земли.

Источник: пресс-служба ОАО «ОАК»

## Ледники Кавказа растают на 40% к 2050 году

К такому выводу пришли сотрудники Высокогорного геофизического института (ВГИ) Росгидромета России, расположенного в Нальчике, наблюдая за деградацией горного оледенения Кавказа

«На Северном Кавказе ВГИ совместно с РАН и Росгидрометом исследует ледники. По нашим оценкам, к середине XXI века уменьшение площади оледенения большого Кавказа может составить, по разным сценариям, 30-45%», — отметил замдиректора института по научной работе Хажбара Калов.

Такие выводы ученые сделали по результатам многолетних наблюдений. «Мы исследуем процесс таяния ледников на Эльбрусе и прилегающих районов (площадь ледников 120 кв. км, это 21 ледник со средней толщиной 80 м, ближе к вершине достигают 150 м). За последние 100 лет ледники сократились на 40% по площади и до 56% по объему. Облация ледников происходит быстрее, чем аккумуляция. Это результат глобального потепления», — уточнил ученый.

Интенсивное таяние ледников, к примеру, в Кабардино-Балкарии, окажет отрицательное воздействие на гидроэнергетику республики и АПК. «Это приведет к тому, что уровень рек Малка, Баксан, Черек уменьшится, что отразится на гидроэлектростанциях, которые каскадом построены на этих горных реках, в полную мощность они работать не смогут. Мы воду используем и для орошения земель, что тоже со временем станет проблематично, от этого пострадает АПК», — добавил Калов.

В свою очередь, экологи подтверждают, что в природе все взаимосвязано и таяние ледников вносит свои коррективы в климат планеты.

Агрометеоролог Гидрометцентра КБР Валентина Орлова свидетельствует, что за последние 70 лет климат в республике стремительно меняется. «Среднегодовая температура воздуха в КБР равна 10,8 °С, что на 1,4 °С выше климатической нормы. За последние 20 лет температура все время поднимается (самый жаркий день в КБР фиксировался 18 августа 1948 года — 39 °С)», — сказала она. По отрицательным температурам, по словам синоптика, «мы не набираем и половины положенной нормы» (самая низкая температура зафиксирована 9 февраля 1969 года — к утру столбик термометра опустился до минус 29,8 °С).

Источник: ТАСС

## Первый российский композитный 3D-принтер может превзойти мировые аналоги

Сотрудники Сколковского института науки и технологий (Сколтех) разработали технологию аддитивной печати изделий из композиционных материалов

Печать из углепластика, позволяет получать изделия, превосходящие по своим механическим характеристикам мировые аналоги. Работа ещё ведётся, но первые результаты весьма вдохновляют исследователей. Так, прочность первых образцов, изготовленных по отечественной технологии, составляет более 400 МПа (прочность конструкционных алюминиевых сплавов — 200-300 МПа). Как утверждают разработчики, по этому показателю они могут превзойти мировые аналоги и даже главного конкурента — материалы американской компании MarkForged — почти в два раза.

Идея, изначально предложенная директором Центра Сколтеха по перспективным конструкциям Зафером Гюрдалом (Zafer Gurdal), была выбрана в качестве одного из проектов для стартап-лаборатории Центра. Профессор Гюрдал начал работу над этим проектом в Университете Южной Каролины, США, в прошлом году и, приехав в Россию, продолжил развивать эту перспективную идею в Сколково. Летом 2014-го года Дмитрий Васильев, магистрант Сколтеха, проходил практику в Университете Южной Калифорнии и работал там над этой темой. Сейчас Дмитрий — полноправный член команды проекта.

«В июле мы подали заявку на субсидию Минобрнауки, — рассказывает в пресс-релизе Сколтеха Фёдор Антонов, старший научный сотрудник Центра. — Несмотря на то, что в тот момент у нас не было работающего прототипа, мы получили финансирование и активизировали работу в октябре 2014-го года. В последующие четыре месяца мы много работали, и

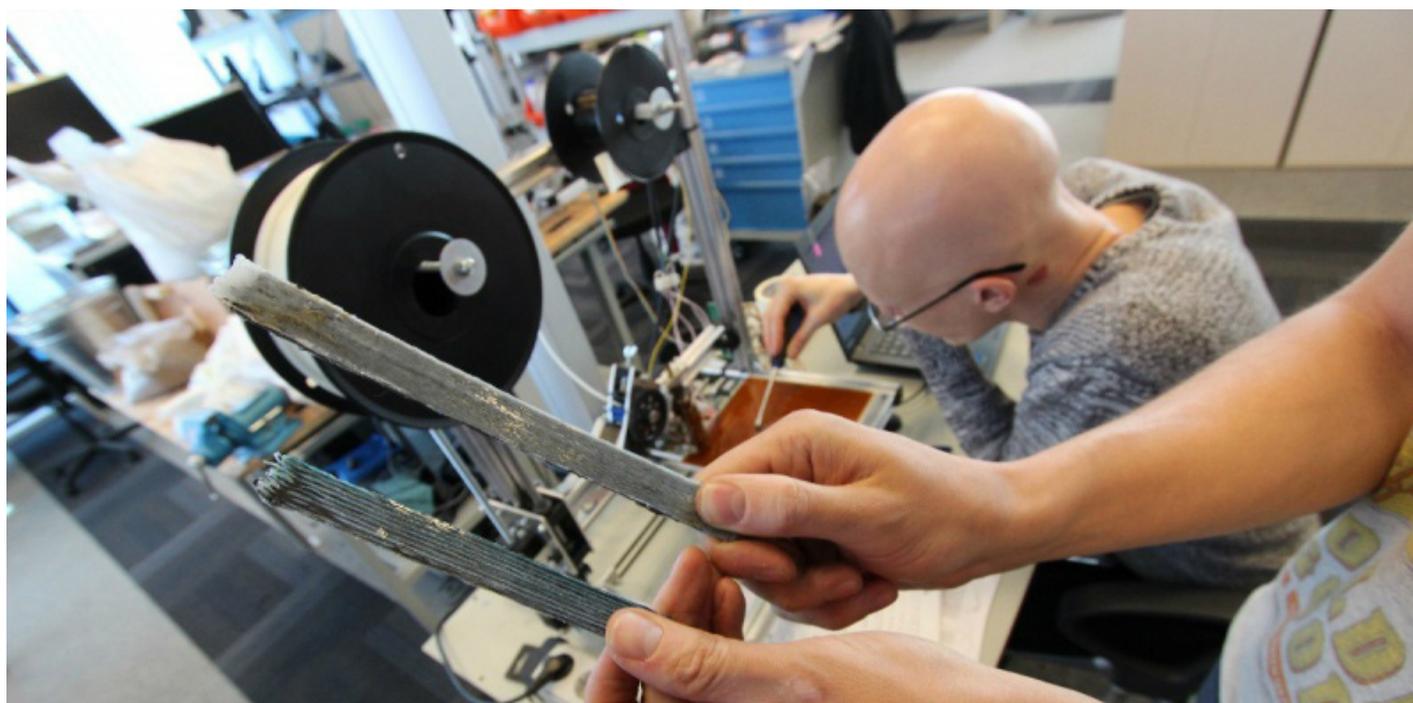
после ряда неудач, пришли, наконец, к рабочему решению: никто не ожидал, что оно окажется настолько эффективным». Сейчас все члены команды крайне воодушевлены перспективами проекта. Уже есть работающий прототип, который может печатать очень прочные и жёсткие детали, есть технология, которую учёные планируют запатентовать.

Сегодня 3D-печать используется преимущественно для быстрого прототипирования, то есть для изготовления макетов, а не реальных изделий. Даже принтер, отправленный и уже опробованный на МКС, пока не в состоянии создать деталь, которая по своим характеристикам подходила бы для реального использования.

Отечественная технология позволит изготавливать на 3D-принтере нагружаемые элементы конструкций, обладающие оптимальной геометрией и внутренней структурой материала (то есть они не сломаются, если к ним в процессе эксплуатации будет приложено определённое усилие). В будущем же эту технологию можно будет использовать и в аэрокосмической отрасли, заключают разработчики. В течение ближайших двух лет учёные планируют спроектировать, изготовить и испытать конструкции из композитных материалов в интересах индустриального партнера проекта — Объединённой ракетно-космической корпорации. Замена материалов (с пластиков для прототипирования на конструкционные и суперконструкционные термопласты) и дальнейшая отработка технологического процесса позволят улучшить текущие показатели ещё в 2-3 раза, уверены исследователи Сколтеха. Если все пойдёт хорошо, инженеры, наверняка, займутся увеличением объёмов производимых деталей.

Все работы ведутся российскими учёными в рамках проекта «Разработка интегрированной системы компьютерного проектирования и инжиниринга для аддитивного производства лёгких и надежных композитных конструкций ключевых высокотехнологичных отраслей промышленности» федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы».

По материалам Сколтех, Вести.ру



Сотрудники Центра перспективных конструкций, производственных технологий и материалов Сколтеха разработали композитный материал который, возможно, является «самым прочным волокнитом в мире». Сколтех

## Микрофлора организма — новый носитель наследственной информации

Ученые из Университета Вашингтона в Сент-Луисе обнаружили новый тип наследования

Раньше всегда считалось, что фенотип организма определяется генотипом. В последние несколько лет активно развивается эпигенетическая теория, согласно которой наследуются не только гены, но и уровень их активности. Теперь к ним добавился еще один механизм — наследование микрофлоры.

Оказалось, что животные с похожими генотипами могут иметь разные фенотипы. Мыши, которые должны были быть одинаковыми, различались между собой по уровню иммуноглобулина А (IgA) в кишечнике. Эти антитела присутствуют на слизистых оболочках, в желудке и кишечнике — везде, где стерильный внутренний мир организма соприкасается с полной вирусной, бактериальной и эукариотической паразитов окружающей средой. Фактически, все выглядело так, будто у части животных содержится мутация в генах, кодирующих IgA, вот только никакой мутации не было.

В основе различий между мышами при идентичном генотипе лежал разный набор бактерий, населяющих кишечник. Большая часть кишечной микрофлоры безвредна для организма хозяина или даже помогает ему переваривать пищу в обмен на свою долю питательных веществ. Когда эмбрион развивается в утробе матери, он защищен от контакта с бактериями, но встречается с ними уже в родовых путях. Матери



Иллюстрация: iStockphoto

активно ухаживают в первые дни за новорожденным потомством, и в это время также происходит интенсивный обмен микрофлорой. Нет ничего удивительного в том, что у мышей, которые живут в стерильных лабораторных условиях, набор кишечных комменсалов наследуется от матери с той же точностью, что и ядерная ДНК.

В этом исследовании авторам удалось доказать связь между составом микрофлоры и уровнем IgA и продемонстрировать пути передачи микрофлоры. Полученные результаты вполне объясняют, откуда берутся фенотипические различия между животными, от которых ученые ожидают идентичности.

Источник: *Vertically transmitted faecal IgA levels determine extra-chromosomal phenotypic variation.* Clara Moon, Megan T. Baldrige, Meghan A. Wallace, Carey-Ann D. Burnham, Herbert W. Virgin & Thaddeus S. Stappenbeck. *Nature*. 2015. doi:10.1038/nature14139. Published online 16 February 2015.

## Американские ученые объявили о новой мощной вакцине против СПИДа

Журнал *Nature* опубликовал результаты эксперимента исследователей из подразделения Института Скриппс (The Scripps Research Institute, TSRI) во Флориде по созданию вакцины против СПИДа

«Наше новое вещество — самое мощное и имеет самый широкий спектр действия из всех известных ингибиторов входа» (т.е. веществ, препятствующих проникновению вируса в клетку) — сообщает профессор TSRI Майкл Фарзан (Michael Farzan), возглавляющий работу.

Лекарство, испытанное на макаках-резусах, эффективно против штаммов ВИЧ-1, ВИЧ-2 и SIV (вирус иммунодефицита обезьян). Препарат блокирует рецепторы, расположенные на поверхности вируса иммунодефицита человека. Именно эти рецепторы позволяют вирусным частицам проникать в иммунные клетки. В основе действия препарата лежат два вещества белковой природы — eCD4-Ig, встречающийся на поверхности клеток иммунной системы человека, и низкомолекулярный пептид CCR5. По словам авторов работы, именно эти два белка позволяют блокировать оба вирусных рецептора, которые встречаются практически во всех штаммах ВИЧ. Этим и обусловлена 100%-ная эффективность препарата. Сам препарат представляет собой небольшую вирусную частицу (аденоассоциированный вирус), переносящий гены этих белков. Эффект сохраняется не менее восьми месяцев после инъекции.



Иллюстрация: iStockphoto

Это открытие базируется на предыдущих работах группы под руководством М. Фарзана по изучению структуры рецептора CCR5 на поверхности CD4+ лимфоцита. На основе этих данных путем воздействия на ДНК был создан белок, связывающийся с двумя сайтами на поверхности вируса. Таким образом, каждый отдельный вирус «ловится» новым белком и уже не может проникнуть в клетку человека. Авторы говорят, что препарат на основе нового белка может использоваться как эффективная вакцина против ВИЧ-1. В дальнейшем ученые планируют испытать свою разработку на людях.

Источник: *AAV-expressed eCD4-Ig provides durable protection from multiple SHIV challenges.* Matthew R. Gardner, Lisa M. Kattenhorn, Hema R. Kondur, et al. *Nature*. 2015. doi:10.1038/nature14264. Published online 18 February 2015.

## Жизнь на Земле появилась на 1,2 миллиарда лет раньше, чем считалось ранее

Геологи из США и ЮАР после изучения древних пород пришли к выводу, что одноклеточная жизнь на Земле возникла примерно 3,2 млрд лет назад, то есть на 1,2 млрд лет раньше, чем считалось до этого. Результаты своих исследований авторы опубликовали в журнале *Nature*

Ранее ученые полагали, что расцвет одноклеточной жизни на Земле начался примерно 2 млрд лет назад. Однако исследование 52 образцов горных пород из Южной Африки и северо-западной части Австралии, возраст которых составляет 3,2–2,75 млрд лет, позволили ученым дать другую оценку времени возникновения жизни. Результаты работы показали, что в палеоархеена планете уже имели место процессы азотфиксации — восстановления молекул азота и включения их в состав биомассы прокариотных микроорганизмов. В изученных породах ученые нашли доказательства того, что уже более 3 млрд лет назад на суше Земли существовали бактерии, потребляющие атмосферный азот.

«Это первое однозначное свидетельство того, что жизнь существовала в далекой древности, что отодвигает время ее появления на миллиард лет в прошлое. Наша работа показала, что на ранней Земле не было никакого «азотного кризиса», как мы считали ранее, и что она могла поддерживать достаточно большую и разнообразную биосферу», — заявил Роджер Бьюик (Roger Buick) из университета Вашингтона в Сиэтле (США).

У этого открытия, помимо сдвига времени расцвета жизни на миллиард лет в прошлое, есть и два других интересных следствия. Во-первых, существование фиксирующих азот бактерий 3,2 млрд лет назад означает, что жизнь на Земле успела «изобрести» сразу два разных способа фиксации азота — современный, появившийся 1,5–2,2 млрд лет назад, и древний, возникший гораздо раньше. Судя по присутствию молибдена



Иллюстрация: Окаменевшие постройки древнейших фотосинтетических бактерий — строматолитов, найденные в Западной Австралии. Didier Descouens.

в древних породах, чьи атомы современные бактерии используют для расщепления азота, этот азотофиксирующий фермент был похож по принципу своего действия на современные белки, которые помогают бактериям «съедать» атмосферный азот. Другой вопрос заключается в том, откуда древние микробы могли взять молибден, если большая часть его попала в мировой океан после появления кислорода в атмосфере.

Отсюда следует второй интересный вывод авторов статьи — источником молибдена для таких бактерий могла служить суша — прибрежные районы, периодически омываемые водами первичного океана планеты.

«Мы никогда не найдем прямых свидетельств и окаменелых «одеяд» из микробов, но наше открытие является косвенным намеком на то, что на суше в то время могла существовать жизнь. Вполне может быть, что микробы «выползли» на сушу и жили в виде слоя слизи на поверхности камней на суше 3,2 млрд лет назад или даже раньше», — заключает Р. Бьюик.

Источник: *Isotopic evidence for biological nitrogen fixation by molybdenum-nitrogenase from 3.2 Gyr*. Eva E. Stüeken, Roger Buick, Bradley M. Guy & Matthew C. Koehler. *Nature*. 2015. doi:10.1038/nature14180. Published online 16 February 2015.

## В Великобритании принят закон о «генномодифицированных» детях

В Великобритании разрешили биологические процедуры по изменению генотипа человека и рождение «генномодифицированных» детей

Соответствующий законопроект принял британский парламент. По данным британских СМИ, новый закон позволяет медицинским специалистам проводить процедуры по искусственному изменению генотипа человека, в результате чего на свет смогут появиться дети, у которых будет три биологических родителя — мать, отец и женщина-донор. Как утверждают британские ученые, у «генномодифицированных» эмбрионов риск проявления мутаций и различных уродств сведен к минимуму. Благодаря новому методу младенцы будут ограждены от многих болезней, таких как аллергия и слепота. Кроме того, как отмечают специалисты, поколение ГМО-детей будет избавлено от генетических заболеваний. Действие нового закона о «генномодифицированных» детях

распространяется на территории Великобритании и Северной Ирландии.

По задумке авторов законопроекта, гены будущего ребенка сложат, как конструктор, из подходящих частичек — генов матери, генов отца и генов здорового донора. Разбирая рабочий материал, ученые смогут удалить неудачные гены, несущие заболевания и другие проблемы, избавляя будущего ребенка от наследственных заболеваний. Таким образом, эмбриону достанется набор идеальных генов от трех человек.

Много лет назад в США в Научном университете Орегона таким способом были рождены 5 макак, сейчас все они выросли и здоровы. Тогда обсуждалась возможность узаконить и «генномодифицированных» детей, но все дискуссии были отложены по двум причинам — во-первых, по этическим соображениям, ведь у ребенка будет трое родителей, а во-вторых, все-таки из-за опасности нарушить важные законы природы.

Нынешний британский законопроект о «генномодифицированных» детях еще нуждается в одобрении со стороны Палаты лордов, но если его все же одобряют, то Великобритания станет первой в мире страной, где на свет появятся генетически модифицированные люди.

Источник: *World hails UK vote on three-person embryos*. Ewen Callaway. *Nature*. No 518. P. 145–146 (12 February 2015) doi:10.1038/518145a.

# «Планетарные границы» — зоны безопасного существования человечества на Земле

*Понятие планетарных границ (planetary boundaries) в 2009 году предложила группа исследователей под руководством Уилла Стеффена из Австралийского национального университета и Йохана Рокстрёма из Стокгольмского центра устойчивого развития при Стокгольмском университете*

Планетарные границы — это границы устойчивости природной системы Земля–Человек, базовые глобальные параметры, в пределах которых возможно долгосрочное безопасное существование человечества на планете. По сути, это наше «безопасное рабочее пространство».

Девять измеряемых переменных величин, определяющих пригодность Земли для проживания человека, предложенные группой ученых в 2009 году, включали:

- 1) изменения климата (содержание в воздухе углекислого газа и уровень космической радиации);
- 2) уровень потери биоразнообразия (число исчезнувших за год видов в расчете на один миллион видов);
- 3) биогеохимические циклы азота и фосфора (количественные изменения в глобальном обороте этих элементов);
- 4) скорость истощения озонового слоя стратосферы;
- 5) скорость закисления океанов;
- 6) объем мирового потребления человеком пресной воды;
- 7) изменение экосистем суши (коэффициент использования человеком земной поверхности);

8) содержание аэрозолей в атмосфере;

9) химическое загрязнение окружающей среды.

Для всех обозначенных величин в качестве отправных точек Концепция планетарных границ предлагала использовать показатели, характерные для голоцена — длительного периода (около 11 700 лет) удивительной стабильности и устойчивости природной системы Земля. В течение этого времени возникла и успешно развивалась человеческая цивилизация, антропогенная активность слабо влияла на состояние глобальной экосистемы. Ситуация резко изменилась с началом промышленной революции и так называемого индустриального периода (антропоцена). Основным геологически значимым признаком человеческой активности — это увеличение уровня углекислого газа (CO<sub>2</sub>) в атмосфере Земли. За последний миллион лет концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере колебалась от 0,018 до 0,028%. В результате деятельности человека уровень CO<sub>2</sub>, начиная с начала промышленной революции, стал резко расти, прежде всего, в результате сжигания ископаемого топлива (угля, нефти и природно-

го газа), а также производства цемента и уменьшения лесных площадей. К 2011 году уровень CO<sub>2</sub> достиг 0,039%.

«Пересечение планетарной границы увеличивает риск того, что деятельность человека может непреднамеренно сделать Землю куда менее приятной для жизни, что помешает усилиям по искоренению бедности и приведет к снижению благосостояния во многих регионах планеты, в том числе и в богатых странах», — говорит профессор Уилл Стеффен.

В своей основополагающей статье (*A Safe Operating Space For Humanity. J. Rockström et al. Nature. 2009. Vol. 461. P. 472–475*), опубликованной в 2009 году, группа ученых представила коли-

« В результате деятельности человека уровень CO<sub>2</sub>, начиная с начала промышленной революции, стал резко расти, прежде всего, в результате сжигания ископаемого топлива (угля, нефти и природного газа), а также производства цемента и уменьшения лесных площадей. К 2011 году уровень CO<sub>2</sub> достиг 0,039%.

чественные оценки для семи из девяти границ и выяснила, что три из них мы уже пересекли (Рисунок 1). Выбросы CO<sub>2</sub> и других парниковых газов привели к росту их концентраций в атмосфере и изменению климата, отдельные последствия которого мы наблюдаем уже сейчас. Вымирание многих видов животных и растений, связанное, прежде всего, с нарушением их сред обитания, дестабилизировало биосферу с точки зрения генетического разнообразия.

Наконец, человек своим повсеместным использованием удобрений решительно вмешался в биогеохимические циклы азота и фосфора.

В своей новой работе, опубликованной в последнем номере журнала Science, те же исследователи обновляют свои модели с учетом новых научных данных, и заявляют о нарушении человечеством четвертой границы (изменение экосистем суши). Кроме того, если раньше планетарная граница,

количественно определяющая биогеохимические циклы элементов была нарушена только по азоту, то теперь предельные значения превышены и по азоту, и по фосфору (Рисунок 2).

Оба элемента широко используются в составе удобрений, и рост крупномасштабного индустриального сельского хозяйства привел к резкому увеличению количества этих веществ в глобальной экосистеме.

«Мы изменили циклы азота и фосфора больше, чем любого другого элемента, — говорит один из авторов исследования, Стивен Карпенгер, директор Центра лимнологии при Университете штата Висконсин. — Рост составляет 200–300%. По сравнению с этим, углерод вырос на 10–20%, и посмотрите, что он сделал с климатом».

Увеличение концентраций фосфора и азота особенно влияет на качество воды. Фосфор является причиной цветения вредоносных водорослей и появления «мертвых зон» с дефицитом кислорода в озерах. Азот же, текущий вниз по реке Миссисипи, является основным виновником заражения вод Мексиканского залива. Хотя в целом уровни азота и фосфора существенно выходят за пределы планетарных границ, отмечается, что их химическая нагрузка неравномерно распределена по всей планете.

«Есть места, которые на самом деле очень перегружены загрязняющими биогенными веществами, — говорит Стивен Карпенгер, — для Северной Америки это — Висконсин и весь район Великих озер. Но есть и другие места, в которых миллиарды людей живут в условиях недостатка азота и фосфора». К примеру, в большей части Африки этих элементов недостает в значительной степени.

Авторы переопределили границу «изменение экосистем суши»: теперь вместо относительной площади суши, преобразованной в пашню, в качестве показателя используется площадь существующих на сегодняшний день лесов по сравнению с доиндустриальной эпохой, то есть — с началом XIX века. По усредненным оценкам, сейчас на своем месте осталось лишь 62% лесов, тогда как безопасная граница проходила по отметке в 75%.

С запасами пресной воды и окислением вод Мирового океана пока все



Рисунок 1. Оценка семи из девяти планетарных границ по состоянию на 2009 год. Зеленым цветом выделена зона предельного (безопасного) уровня. Для двух планетарных границ параметры не определены.



Рис. 2. Оценка семи из девяти планетарных границ по состоянию на 2015 год. Зеленым цветом выделена зона предельного (безопасного) уровня, желтым — зоны нарастающего риска, красным — зоны высокого риска.

«Мы изменили циклы азота и фосфора больше, чем любого другого элемента, — говорит один из авторов исследования, Стивен Карпентер, директор Центра лимнологии при Университете штата Висконсин. — Рост составляет 200-300%. По сравнению с этим, углерод вырос на 10-20%, и посмотрите, что он сделал с климатом.

терпимо: ни там, ни там критические значения пока не преодолены, хотя авторы подчеркивают, что вторая граница напрямую привязана к изменению климата, с которым ситуация довольно плачевная. Граница по загрязнению атмосферы аэрозолями (взвешью, состоящими из капелек жидкости и твердых частиц пыли и сажи), глобально не определена. Ученые предлагают рассматривать эту проблему на региональном уровне — там, где она стоит достаточно остро и имеет ключевое значение для здоровья населения (это прежде всего промышленные районы Китая и Юго-Восточной Азии и некоторые города США).

По-настоящему нормально дела обстоят у нас только с одной границей — «толщиной» озонового слоя. Минимальный предел концентрации озона в стратосфере, по данным авторов, последние 15 лет остается стабильным, в том числе над Антарктикой, где все еще возникает сезонная озоновая дыра. В ближайшие годы ситуация будет только улучшаться, и дыра постепенно «затянется».

Для количественной оценки параметров использовались данные открытых и научных публикаций, отчетов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC), Международной геосферно-биосферной программы (IGBP). Некоторые анализы были проведены специально для данного исследования. Так, оценка уровня потребления пресной воды была сделана на основе оригинальной методики вычисления среднемесячного стока рек, а коэффициент взаимосвязи биогеохимических циклов азота и фосфора — получен из соотношения N/P в тканях растений.

Две границы полностью поменяли свои названия по сравнению с первоначальным вариантом 2009 г. Граница «уровень потери биоразнообразия» теперь называется «целостность биосферы» (Biosphere integrity) и имеет два количественных показателя — генетическое разнообразие (Genetic diversity) и функциональное разнообразие (Functional diversity). А граница «химическое загрязнение» стала носить название «новые соединения» (Novel entities). Количественно эта граница пока не определена, но необходимость ее очевидна. Земляне, как отмечается в статье, «по сути, ведут полномасштабные глобальные эксперименты» с более чем ста тысячами синтетических соединений, влияние которых на окружающую среду и здоровье человека понятно не до конца.

За каждой планетарной границей имеется «зона неопределенности». В эту зону выносятся все неизбежные неточности вычислений, это своего рода буферная полоса, в рамках которой специалисты, принимающие решения, еще могут предпринять какие-то действия, что-то изменить и исправить, прежде чем станет слишком поздно. И, наконец, за пределами этой буферной зоны начинается неизвестность — пространство, в котором обратная реакция системы Земля на изменения, производимые в ней человеком, непредсказуема.

«За каждой планетарной границей имеется «зона неопределенности». В эту зону выносятся все неизбежные неточности вычислений, это своего рода буферная полоса, в рамках которой специалисты, принимающие решения, еще могут предпринять какие-то действия, что-то изменить и исправить, прежде чем станет слишком поздно.

Концепция планетарных границ — удобный инструмент для определения пределов безопасной активности человека на планете. Его можно привлекать для решения самых разнообразных проблем: экологических, политических, социальных. Решать эти

проблемы всегда надо с оглядкой на взаимосвязи между граничными факторами. Например, если снижать объемы ирригации в сельском хозяйстве, чтобы не нарушить границу по пресной воде, то нельзя просто компенсировать это снижение расширением посевных площадей: это приведет только к дальнейшему ухудшению ситуации с границей по наземным экосистемам. То есть, нужны более продуманные меры по эффективному использованию воды и повышению урожайности.

И это не просто перечень коэффициентов надежности или запасов прочности. Такая планетарная граница, как скорость разрушения озонового слоя, может служить наглядным примером того, как оперативно мировые лидеры отреагировали на угрозу экологической катастрофы. После того, как была обнаружена растущая озоновая дыра, образовавшаяся в результате выбросов в атмосферу искусственных химических веществ — хлорфторуглеродов (ХФУ), — в 1980-х годах многие страны мира запретили их использование. В результате, ситуация с озоновым слоем нормализовалась. Пример озона показывает, что человечество все же способно, даже переступив границу, принять меры и вернуться в зону безопасного существования.

По словам ученых, нельзя с уверенностью сказать, что после нарушения планетарной границы сразу же наступит катастрофа. Никто не знает, что произойдет с цивилизацией, если планетарные условия будут меняться и дальше. Но авторы статьи в Science утверждают, что наша планета «скорее всего, будет гораздо менее пригодной для развития человеческого общества». Они уточняют, что не собирались предлагать решения экологических проблем, а всего лишь хотели предоставить информацию по теме. Данная работа — это своего рода отчет, в котором использованы новые данные за последние пять лет, позволяющие более ответственно подходить к принятию любых решений по изменениям нашего общего дома — планеты Земля.

*Источник: Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Will Steffen, Katherine Richardson, Johan Rockström, et. al. Science. 2015. Vol. 347. No 6223. P. 736 (1259855-1-10). Реферат статьи опубликован на с. 23*

Vol. 518. No 7537  
5 февраля 2015 года<sup>1</sup>



Vol. 112. No 5  
10 февраля 2015 года<sup>2</sup>



Vol. 347. No 6222  
6 февраля 2015 года<sup>3</sup>



Nature · PNAS · Science: рефераты статей

### 13 Естественные и точные науки

- 13 Физика и астрономия
- 16 Биологические науки
- 22 Науки о земле и смежные экологические науки
- 28 Прочие естественные и точные науки

### 30 Медицинские науки и общественное здравоохранение

- 30 Фундаментальная медицина
- 34 Клиническая медицина

### 36 Техника и технологии

- 36 Электротехника, электронная техника, информационные технологии
- 37 Нанотехнологии
- 38 Технологии материалов

### 40 Социальные науки

- 40 Психологические науки

### 41 Междисциплинарные исследования

<sup>1</sup> В номере также приведены рефераты журнала Nature от 12 февраля 2015 года. Vol. 518. No 7538.

<sup>2</sup> В номере также приведены рефераты журнала PNAS от 3 февраля 2015 года. Vol. 112. No 5.

<sup>3</sup> В номере также приведены рефераты журнала Science от 13 февраля 2015 года. Vol. 347. No 6223.

## Супермассивная тесная двойная черная дыра в квазаре с оптической периодичностью

A possible close supermassive black-hole binary in a quasar with optical periodicity. Matthew J. Graham, S. G. Djorhovsky, Daniel Stern, Eilat Glikman, Andrew J. Drake, Ashish A. Mohabal, Giro Donalek, Steve Larsen, Eric Christensen. Nature. 2015. Vol. 518. No 7537. P. 74–76.

Давно известно, что квазары являются источниками переменного излучения на всех длинах волн. Их оптическая переменность носит случайный характер и может быть описана различными физическими механизмами. Она также хорошо описывается в рамках модели случайных блужданий с наличием демпфирования. Обширные серии кривых блеска квазаров, полученные недавно, дают возможность выполнить систематические исследования их переменности на качественно новом уровне. В работе сообщается о наблюдениях периодического излучения квазара PG-1302-102 в оптическом диапазоне с периодом  $1884 \pm 88$  сут (в собственной системе покоя источника период равен  $1474 \pm 69$  сут). Этот источник был обнаружен в результате анализа кривых блеска 247000 известных (спектроскопически подтвержденных) квазаров на временном отрезке около девяти лет. Наиболее вероятная причина переменности, по мнению авторов, обусловлена структурой квазара, состоящего из супермассивной тесной двойной системы черных дыр с относительным расстоянием около 0,01 пс, вращающихся относительно общего центра масс. Ожидается, что подобные системы возникают при слиянии галактик, а их изучение позволяет получить важные ограничения для моделей образования и эволюции галактик. Двойные системы супермассивных черных дыр (СЧД) с расстоянием порядка 1 пс нельзя разделить без применения радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой. Альтернативным подходом изучения структуры этих объектов является анализ их переменности с помощью построения кривых блеска. В работе использован новый комбинированный метод анализа кривых блеска квазаров с применением вейвлет-анализа и автокорреляционных функций (АКФ), позволяющий идентифицировать объекты с заметной периодичностью кривых блеска. Анализировались данные наблюдений из обзора Catalina Real-time Transient Survey (CRTS). Этот обзор начал формироваться в 2004 г. в университете штата Аризона с помощью системы трех телескопов по программе обнаружения астероидных тел, представляющих угрозу для Земли. Квазар PG-1302-102 является самым явным объектом, заподозренным в периодичности, среди 20 объектов, удовлетворяющих критериям отбора: наличие сильного постоянного вейвлет-пика и заметной периодичности АКФ, достаточно широкий интервал наблюдений, в котором имеется не менее 1,5 циклов периодичности, а также синусоидальный вид кривой блеска. Квазар PG-1302-102 имеет красное смещение 0,2784 и видимую звездную величину 15,0 mag. Он не попал в каталог Sloan Digital Survey, хотя и ассоциируется с яркими инфракрасными и рентгеновскими источниками. Его масса  $M$  оценивается величиной  $\log(M/M_{\odot}) = 8,3 \pm 9,4$ , где  $M_{\odot}$  — масса Солнца, а амплитуда изменения блеска равна 0,14 mag. Если этот квазар действительно окажется двойной СЧД, то он станет очень хорошим кандидатом на проведение гравитационно-волновых экспериментов, чувствительных к волнам наногерцового диапазона.

Г. В. Дедков

## Комета 67P/Чурюмова–Герасименко сбрасывает пылевой покров, накопленный в течение предыдущих четырех лет

67P/Churyumov-Gerasimenko sheds dust coat accumulated over the past four years. Rita Schulz, Martin Hilchenbach, Yves Langevin, et al. Nature. 2015. Vol. 518. No 7538. P. 216–218.

Кометы состоят из пыли и замерзших газов. Льды перемешаны с огнеупорными материалами, представляющими ледяные конгломераты или скопления частиц протосолнечного происхождения, покрытых ледяной коркой. Среди этих льдов присутствует также и водный лед. При приближении к Солнцу происходит сублимация льдов и выбросы газа из внешней оболочки кометы, вместе с которыми выбрасываются и пылевые частицы. Исследования состава льда и пылевых частиц дают богатую информацию о происхождении воды в Солнечной системе и на Земле, о предыстории их образования и причинах наблюдаемой распространенности элементов. Изучение состава вещества кометы 67P/Чурюмова–Герасименко на космической станции Rosetta, проводящейся с августа прошлого года, когда Rosetta вышла на параллельную с ней орбиту, дает уникальную возможность ответить на эти вопросы. Однако ситуация осложняется тем, что выбрасываемые кометой частицы не обязательно генетически связаны с ней, а могли быть захвачены в процессе движения по орбите, образуя пылевой покров, который сбрасывается при очередном прохождении перигелия, затрудняя выход первичных материалов кометы, или смешиваясь с ними. В работе описаны результаты изучения выброшенного вещества кометы 67P, полученные за истекший период времени. Измерения выполнялись с помощью бортового ионного масс-анализатора. Пылевые частицы сначала собирались на специальных подложках и фотографировались. Затем определялся их химический состав методом времяпролетной вторичной ионной масс-спектрометрии с использованием ионного пучка атомов индия. Расстояние станции от кометы, на котором производился забор частиц, равнялось 10–20 км. Пылевые частицы были собраны, когда комета находилась на расстояниях 3,11–3,07 а. е. от Солнца. По данным Rosetta, собранные частицы принадлежат пылевой коре кометы, затрудняющей выход вещества из более глубоких слоев. Зерна большего размера (>50 мкм) имели рыхлую пушистую структуру с пористостью более 50 % и рассыпались при попадании на пластины коллектора. Вероятно, они являются агрегатами межпланетных пылевых частиц. Их поверхность обогащена натрием, что объясняет высокое содержание натрия в кометных метеороидах. С другой стороны, это противоречит мнению о том, что кометная пыль состоит из силикатов, покрытых органическими огнеупорными материалами, а затем ледяной коркой с преобладанием водного льда. При предыдущем прохождении перигелия орбиты (6,5 лет назад) количество пыли, сбрасываемой кометой 67P, удвоилось при гелиоцентрических расстояниях между 2,7 и 2,5 а. е., когда ядро сбросило внешнюю пылевую мантию. После этого стала развиваться кома, а состав выбрасываемых частиц радикально изменился. В текущем цикле движения, по-видимому, мантия была сброшена между 24 декабря 2014 г. и 20 января 2015 г., а изменение состава кометных частиц будет регистрироваться в ближайшем будущем.

Г. В. Дедков

## Образование четверной звездной системы с большим удалением компонентов

The formation of a quadruple star formation with wide separation. Jaime E. Pineda, Stella S. R. Offner, Richard J. Parker, et al. Nature. 2015. Vol. 518. No 7538. P. 213–215.

Первоначальная кратность звездных систем является весьма неопределенной. Для объяснения образования двойных и кратных систем было предложено несколько механизмов, включая фрагментацию ядерных и дисковых зон первичных конденсаций, а также захват звезд из окружающего пространства. Наблюдения показывают, что кратность в протозвездных системах до момента их выхода на главную последовательность эволюционного цикла выше, чем в рассеянных звездах поля. Это говорит о том, что динамические взаимодействия в молодых формирующихся системах происходят достаточно рано, расщепляя компоненты и изменяя расстояния между ними. Однако без прямых наблюдений (с высоким разрешением) звездных систем, находящихся в начальной стадии формирования, трудно установить доминирующий механизм их образования и кратность. В работе приведены результаты наблюдений четверной системы Barnard 5 (B5) с большим удалением компонентов друг от друга (более 1000 а. е.), состоящей из молодой протозвезды и трех гравитационно-связанных газовых конденсаций. Система B5 представляет собой плотное ядро конденсации, находящееся в области звездообразования созвездия Персея на расстоянии 250 пк от Земли. Наблюдения проводились на антенной решетке радиотелескопов (Very Large Array, VLA) в линиях  $\text{NH}_3(1,1)$  и  $\text{NH}_3(2,2)$  в полосе частот 4 МГц для каждой линии и выявили волокнистую структуру источника B5. В волокнах идет интенсивное звездообразование. Протозвезда B5-IRS1 имеет массу  $0,1 M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  — масса Солнца), а массы конденсаций B5-Cond1, B5-Cond2 и B5-Cond3 равны  $0,36 \pm 0,09 M_{\odot}$ ,  $0,26 \pm 0,12 M_{\odot}$  и  $0,30 \pm 0,13 M_{\odot}$ , соответственно. Ожидается, что из каждой конденсации образуется звезда примерно через 40000 лет. Массы были определены по интенсивности теплового излучения облаков. Размеры конденсаций равны 2800, 2300 и 2500 а. е., а проекционные расстояния между ними и протозвездой составляют 3300, 5100 и 11400 а. е. Радиусы областей, в которых находится половина массы конденсаций, примерно равны половине их радиусов. Это показывает, что центральные зоны конденсаций сжимаются быстрее. И хотя расстояния между компонентами велики, их величина согласуется с результатами численного моделирования фрагментации ядер. При моделировании протозвездные расстояния быстро изменяются на временном отрезке около 0,1 млрд лет, при этом некоторые кратные системы распадаются, а другие, напротив, становятся более тесными. Расчеты динамической стабильности системы B5, выполненные авторами, показывают, что наиболее тесная пара конденсаций со временем образует двойную звезду, тогда как вся четверная система распадется через 0,5 млн лет. Это время примерно совпадает с продолжительностью протозвездной фазы эволюции. Таким образом, наблюдаемая фрагментация, происходящая в волокнах газовых конденсаций, представляет реальный сценарий формирования кратных систем. Дальнейшие наблюдения позволят определить частоту возникновения волокон и субструктур ядерных областей, а также распределение расстояний в формирующихся кратных системах.

Г.В. Дедков

## Диспропорционирование заряда и вызываемый давлением фазовый переход изолятор–металл в кубическом перовските $\text{PbCrO}_3$

Charge disproportionation and the pressure-induced insulator–metal transition in cubic perovskite  $\text{PbCrO}_3$ . Jinguang Cheng, K. E. Kweon, S. A. Larregola, Yang Ding, Y. Shirako, L. G. Marshall, Z.-Y. Li, X. Li, António M. dos Santos, M. R. Suchomel, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, G. S. Hwang, John B. Goodenough, J.-S. Zhou. PNAS. 2015. Vol. 112. No 6. P. 1670–1674.

Перовскит ( $\text{PbCrO}_3$ ) является антиферромагнитным диэлектриком. Известно, что стерическая активность одинокой пары электронов  $\text{Pb}^{2+}$  может приводить к экзотическим физическим свойствам содержащих его соединений. Тем не менее, были не ясны фундаментальные взаимодействия, приводящие к диэлектрическому состоянию в этом одновалентном перовските. Кроме того, остается нерешенным вопросом беспрецедентное уменьшение объема, наблюдаемое при скромном давлении 1,6 ГПа. Размер ячейки также существенно больше, чем можно было бы ожидать исходя из размера А-катиона. Проведена серия измерений давления и характеристик переноса электронов в перовските, полученном спеканием под давлением стехиометрической смеси  $\text{PbO}$  и  $\text{CrO}_2$ . Так как известно, что  $\text{PbCrO}_3$  дает сильно нерегулярный пиковый профиль рентгеновской дифракции, проведены также измерения спектра рентгеновского поглощения и исследование кристаллической структуры при помощи рентгеновской и нейтронной дифракции. Данные по рентгеновской дифракции с высоким разрешением обрабатывались с помощью метода Ритвельда. Структурный анализ при комнатной температуре проводился с помощью ячейки с алмазными наковальнями, смонтированной на дифрактометре с молибденовым анодом. Измерения нейтронной дифракции при высоком давлении проводились с помощью времяпролетного дифрактометра среднего разрешения. Температурная зависимость удельного сопротивления под давлением при низких температурах вплоть до 4,5 К получена с помощью четырехэлектродного датчика в кубической ячейке с алмазными наковальнями. Полученные данные позволяют прояснить физические причины, определяющие диэлектрическое состояние и фазовый переход под давлением. Даже уточнение данных по синхротронной рентгеновской дифракции, учитывающее смещение Pb с положения  $(1/2, 1/2, 1/2)$  не дает хорошего соответствия с регулярной структурной моделью. При этом соответствие экспериментальным данным может быть получено в предположении о статической разупорядоченности атомов Cr. Предположено, что диспропорция зарядов при переходе  $3\text{Cr}^{4+}$  в  $2\text{Cr}^{3+} + \text{Cr}^{6+}$  в сочетании с  $6s$ - $p$ -гибридизацией  $\text{Pb}^{2+}$  отвечает за изолирующее основное состояние  $\text{PbCrO}_3$  при нормальном давлении, а фаза диспропорционированного заряда подавляется под давлением, отвечая за переход к металлическому фазовому состоянию. Таким образом, можно считать, что стереохимический эффект  $\text{Pb}^{2+}$  в перовскитах чувствителен к количеству и энергии  $d$ -электронов. Предложенная модель подтверждается теорией функционала плотности, а также расчетами корреляционной энергии.

А. В. Якименко

## Реализация теории узлов в нематических коллоидах

Knot theory realizations in nematic colloids. Simon Copar, Uroš Tkalec, Igor Muševič, and Slobodan Žumer. PNAS. 2015. Vol. 112. No 6. P. 1675–1680.

Нематические косы — это реконфигурируемые узлы и связи, образованные дисклинационными петлями, которые опутывают коллоидные частицы, диспергированные в нематических жидких кристаллах (ЖК). Рассмотрены запутанные нематические дисклинации в тонких скрученных слоях, стабилизированных двумерными массивами коллоидных частиц, которыми можно управлять с помощью лазерного пинцета. Для собранных в эксперименте структур продемонстрировано соответствие физически наблюдаемых свойств, характерных для рассматриваемой геометрии — с одной стороны, инвариантам петель, а так же построенным графам и поверхностям, связанным с дисклинационной петлей — с другой. Симметрия, вызванная топологией поля директора, отражается в характере зацеплений, позволяя прямо вычислить полиноми Джонса и связанные инварианты. Кроме того, при использовании волновой пластинки, которая вводит фазовый сдвиг, зависящий от цвета, противоположно закрученные домены видны в виде цветных областей, которые соответствуют плоскому графу, связанному с проекцией узла, видимой под микроскопом, и помогают построить поверхность Понтрягина–Тома. Вместе с многофотонной люминесцентной микроскопией, прямо дающей поверхность Понтрягина–Тома для реального образца, этот метод позволяет проводить прямое сравнение теоретического результата с экспериментальным для подтверждения предсказанных результатов или калибровки эксперимента. Так как дефекты регулярно разграничивают области с разной оптической сигнатурой, метод может быть обобщен для других систем с нарушением хиральной симметрии, при условии, что перехлесты узла или частицы не перекрываются на вертикальной проекции. Кроме топологических инвариантов узлов, для дисклинационных петель есть и собственные топологические правила. Коэффициент самозацепления и вся матрица зацепления для многокомпонентной связи добавляет простым математическим узлам дополнительную внутреннюю структуру. Показано, что с помощью коэффициента самозацепления и количества компонентов можно упорядоченно описать заузленные структуры. Наблюдалось упорядочение, слабо связывающее число самозацепления и тип узла, особенно для хиральных узлов. Хотя нет строгого закона, связывающего топологию узлов с числом самозацепления, наблюдается качественная иерархия. Таким образом, нематическая природа среды добавляет дополнительные топологические параметры к обычным результатам теории узлов, упорядочивая фазовую диаграмму возможных структур. Скрученная нематическая ЖК ячейка представляет собой на сегодняшний день наиболее сложный пример системы, где поверхность Понтрягина–Тома может быть легко получена без моделирования или измерения поля директора. Полученная экспериментальная реализация абстрактных топологических понятий дает возможность нового взгляда на задачи топологии, а приложение топологических методов к свойствам физических систем позволяет более точно предсказывать их поведение.

*А. В. Якименко*

## Оптически индуцированные трансляционные и вращательные движения микростержней в нематическом жидком кристалле

Optically driven translational and rotational motions of microrod particles in a nematic liquid crystal. Alexey Eremin, Pemika Hirankittiwong, Nattaporn Chattham, Hajnalka Nádasí, Ralf Stannarius, Jumras Limtrakul, Osamu Haba, Koichiro Yonetake, and Hideo Takezoe. PNAS. 2015. Vol. 112. No 6. P. 1716–1720.

Экспериментально показано, что небольшое количество азо-дендримерных молекул, растворенных в жидком кристалле делает возможными поступательные и вращательные движения микростержней в жидкокристаллической матрице под воздействием неполяризованного УФ-облучения. В эксперименте был использован коммерчески доступный кристалл 5СВ с добавкой 0,1% по весу азо-дендримеров на основе полипропиленмина. В кристалл были введены стеклянные микростержни диаметром  $1,49 \pm 0,07$  мкм и длиной от 10 до 25 мкм. Наблюдения проводились в стандартных сэндвич-ячейках толщиной 6, 10 и 25 мкм с помощью поляризационного микроскопа и ПЗС-камеры. Ультрафиолетовое облучение производилось через отраженный световой тракт микроскопа с помощью ртутной лампы (линия 365 нм, отфильтрована с помощью интерференционного фильтра и дихроического зеркала). Наблюдалось вызванное облучением изменение поля директора вокруг неподвижных микростержней, зафиксированных на стеклянном субстрате. Далее наблюдался опто-механический отклик свободных микростержней, в виде вращения в плоскости ячейки и вертикальной плоскости, а также сдвига в плоскости ячейки. Вращательные движения в обеих плоскостях полностью обратимы. Вращение происходит даже при малых интенсивностях облучения, но угол вращения уменьшается при уменьшении интенсивности. Зависимость угла и скорости поворота носит характер зависимости с насыщением. Сдвиг наблюдался в направлении оси и на расстояние порядка длины микростержня. Обратимость не наблюдалась, но зафиксировано небольшое обратное движение стержней при снятии ультрафиолетового облучения. Затем был продемонстрирован оптомеханический эффект вызванного облучением вращения и сдвига микрометровой частицы в нематическом узле. Система представляла собой управляемый оптически молекулярный микропривод, использующий молекулярную реориентацию на поверхности частицы и преобразует ее в механический крутящий момент. Наблюдавшееся движение объяснено вызванным действием света транс-цис-конформационным изменением дендримера, адсорбированного на поверхности стержня и соответствующей переориентацией директора. Направление изгиба цис-конформеров не является случайным, но селективно выбранным из-за изогнутой поля локального директора в непосредственной близости от открытой дендримером поверхности. Вокруг стержней возникают различные типы искажений директора, в зависимости от ориентации стержней по отношению к полю нематического директора. Это ведет к различным видам движений, приводимым в действие крутящими моментами, действующими на частицы со стороны переориентации директора.

*А. В. Якименко*

## Переключение репликации и транскрипции в митохондриях человека

Replication-transcription switch in human mitochondria. Karen Agaronyan, Yaroslav I. Morozov, Michael Anikin, Dmitry Temiakov. Science. 2015. Vol. 347. No 6221. P. 548–551.

Координированная репликация и транскрипция митохондриального генома необходимы для поддержания энергетического метаболизма клетки. Механизмы, регулирующие согласование этих процессов еще до конца не ясны. Одним из участников процесса координации считывания РНК и ДНК с цепей митохондриального генома является фактор элонгации транскрипции TEFM. С использованием выделенных белков, участвующих в синтезе РНК в митохондриях и радиоактивно меченых нуклеотидов, путем проведения реакций транскрипции в бесклеточной системе была охарактеризована роль TEFM в регуляции репликации и транскрипции. Как было установлено в данном исследовании, взаимодействие TEFM с митохондриальной РНК-полимеразой и формирующимся транскриптом препятствует формированию затравок синтеза ДНК и стимулирует транскрипцию. Геном митохондрий содержит два промотора — промотор легкой цепи и промотор тяжелой цепи, с которых считываются два транскрипта. На расстоянии 120 нуклеотидов от промотора легкой цепи находится консервативная область CSBII, богатая остатками гуанина. В участке CSBII синтезируемая РНК и цепь ДНК комплементарная матричной формируют четырехцепочечную структуру. Связи этой структуры с комплексом элонгации слабы, а поскольку за ней лежит терминирующий регион, богатый А и Т, комплекс элонгации дестабилизируется и элонгация РНК обрывается. В комплементарной цепи в данном регионе находится ориджин репликации *oriH*, и обрыв транскрипции ведет к формированию затравки для удвоения генома, начинающегося с этого ориджина. Участок CSBII отличается изменчивостью, затрагивающей насыщенность участка гуанином. Более протяженные гуанинсодержащие последовательности эффективнее обрывают транскрипцию в данном регионе. С помощью фотореактивных аналогов нуклеотидов, используемых в качестве метки РНК, и ДНК-матрицы, содержащей промотор легкой цепи и регион CSBII, было показано, что в TEFM связывается с РНК в составе формирующейся CSBII четырехцепочечной структуры. За счет этого в присутствии TEFM транскрипция не обрывается на данном консервативном блоке. Митохондриальная РНК-полимераза характеризуется низким сродством к дуплексу ДНК, расположенному перед ней на пути ее следования. TEFM связывается с митохондриальной РНК-полимеразой в ее С-терминальном регионе, его функция в составе комплекса элонгации — компенсация неспособности РНК-полимеразы взаимодействовать с двуцепочечной ДНК. В отсутствие TEFM производительность митохондриальной РНК-полимеразы низкая, ее не достаточно для транскрипции всего генома, в системе накапливается только олигомерный продукт. Его формирование является результатом диссоциации комплекса элонгации РНК и повторной инициации транскрипции. Только при наличии TEFM, за счет прохождения РНК-полимеразой участка CSBII и повышения ее сродства к ДНК, формируется полноразмерный транскрипт митохондриального генома. Таким образом, TEFM осуществляет переключение между репликацией и транскрипцией в митохондриях путем стабилизации комплекса элонгации, процессы репликации и транскрипции митохондриального генома являются взаимоисключающими.

А. Н. Ваганова

## Маркировка активных рефлекторных дуг *in vivo* с помощью разработанных кальциевых интеграторов

Labeling of active neural circuits *in vivo* with designed calcium integrators. Benjamin F. Fosque, Yi Sun, Hod Dana, Chao-Tsung Yang, Tomoko Ohyama, Michael R. Tadross, Ronak Patel, Marta Zlatic, Douglas S. Kim, Misha B. Ahrens, Vivek Jayaraman, Loren L. Looger, Eric R. Schreier. Science. Vol. 347. No 6223. P. 755–760.

Потенциалы действия в нейронах приводят к временным изменениям внутриклеточной концентрации свободного кальция, что может быть индикатором активности рефлекторных дуг. На базе кальций-связывающего белка — кальмодулина с фотоконвертируемым белком EosFP авторы разработали флуоресцентный кальциевый индикатор CaMPARI. CaMPARI необратимо конвертируется из белка с длиной волны экситации 500 нм в белок с длиной волны экситации 560 нм при условии достаточной внутриклеточной концентрации свободного кальция и одновременном световом пульсе (405 нм). Авторы создали несколько вариантов CaMPARI с разной аффинностью к кальцию, расширив таким образом диапазон применения этих индикаторов для разных клеток. В первичных нейрональных культурах гиппокампа крысы фотоконверсия CaMPARI происходила при электрической стимуляции одновременно с пульсом света (405 нм). Уровень фотоконверсии примерно линейно коррелировал с частотой стимуляции. Авторы также деполяризовали нейроны с помощью увеличения концентрации внеклеточного калия и АТФ вместе с пульсом для фотоконверсии индикатора. Возможность детекции фотоконверсии CaMPARI сохранялась после фиксации клеток, а также появлялась возможность анализа экспрессии белковых маркеров иммунокрашиванием. Для экспериментов *in vivo* авторы выбрали четыре модели: личинки рыб *Danio rerio*, личинки и взрослые особи *Drosophila melanogaster*, а также первичную зрительную кору мыши. Клеточный паттерн фотоконверсии CaMPARI в личинках рыб зависел от типа стимула. При свободном плавании, фотоконверсия происходила в *prosencephalon*, *habenula* и *rhomencephalon*, но мало в *Superior colliculus*. Анестезия личинок приводила к отсутствию фотоконверсии во всем мозге. В *D. melanogaster*, экспрессирующей CaMPARI в периферических сенсорных нейронах, значительная фотоконверсия от вибрационного стимула происходила в хордотональных нейронах, но не в проприоцептивных или ноцицептивных нейронах. В зрительной коре мыши *in vivo* были выбраны пирамидальные клетки, активирующие кальциевый ответ на визуальный стимул движения полос в определенном направлении. В качестве контроля были выбраны соседние клетки, активирующиеся визуальным стимулом с другим направлением движения или не отвечающие на такой раздражитель. Селективная активация определенным визуальным раздражителем приводила к большей фотоконверсии в выбранных клетках визуальной коры мозга, чем в контрольных клетках. С помощью CaMPARI авторы показали возможность отображения сенсорно-активируемых рефлекторных дуг у *D. melanogaster*, презентуя обонятельные раздражители, а также используя оптогенетическую стимуляцию Ir84a нейронов. Таким образом, CaMPARI позволяет создавать карту активации рефлекторных дуг *in vivo*, а также совместим с последующим анализом белковых маркеров и генетического профиля клеток. Возможно, те же принципы могут быть применены к интересующим лиганд-связывающим доменам, что и к кальмодулину, для разработки других сенсоров на основе EosFP.

Н. Б. Илларионова

## Структурные основы разрушения межклеточного плотного контакта энтеротоксином *Clostridium perfringens*

Structural insight into tight junction disassembly by *Clostridium perfringens* enterotoxin. Yasunori Saitoh, Hiroshi Suzuki, Kazutoshi Tani, Kouki Nishikawa, Katsumasa Irie, Yuki Ogura, Atsushi Tamura, Sachiko Tsukita, Yoshinori Fujiyoshi. Science. 2015. Vol. 347. No 6223. P. 775–778.

Попадая в кишечник, *Clostridium perfringens* продуцирует энтеротоксин (*Clostridium perfringens* enterotoxin, CPE), который, связываясь своей С-концевой частью (С-CPE) с рецепторами (клаудинами 3 и 4), агрегируется с образованием большого олигомера. Этот олигомер встраивается в клеточную мембрану и образует ионный канал, что приводит к запуску клеточной смерти. Клаудины имеют схожую структурную топологию: четыре трансмембранных сегмента (ТМ), первый экстраклеточный сегмент (ECS1), содержащий клаудиновый консенсусный мотив, а также второй экстраклеточный сегмент (ECS2). Связываясь друг с другом, клаудины формируют плотные контакты между эпителиоцитами. Данная работа посвящена изучению структурных основ узнавания специфических клаудинов белком С-CPE. Авторы установили, что из клаудинов мыши, наиболее прочный комплекс с белком С-CPE формирует клаудин-19. Инкубация клеток с С-CPE приводила к делокализации клаудина-19 из зоны контакта. По всей видимости, взаимодействие клаудина-19 с С-CPE вызывает его диссоциацию от плотного контакта. Для кристаллизации были удалены 26 С-концевых аминокислотных остатков клаудина-19. Кроме того, три ближайших к мембране цистеина были заменены на аланин. Данный белок (mCldn19<sub>cryst</sub>) был закристаллизован в комплексе с С-CPE, и структура комплекса была определена с разрешением 3,7 ангстрема. В асимметрической части ячейки содержатся две молекулы комплекса клаудин-токсин, структуры которых фактически не отличаются друг от друга. Структура mCldn19<sub>cryst</sub> напоминает структуру клаудина-15 мыши (mCldn15) с типичным левым пучком четырех спиралей. Образование комплекса не изменяет структуру С-CPE, однако, ориентация β-структурных ECS1 и ECS2 в mCldn19<sub>cryst</sub> отличается по сравнению с mCldn15. В частности, в mCldn19<sub>cryst</sub> в отличие от mCldn15, петля между тяжами β1 и β2 хорошо структурирована и контактирует с С-CPE. Авторы установили, что комплекс стабилизирован водородными связями консервативного N150<sup>Cldn</sup> с карбонильной группой главной цепи R311<sup>CPE</sup>, а также боковой цепью R227<sup>CPE</sup> и др. Консервативный мотив (A/N/S)-I-(I/L/V)-(T/V) (остатки 39–42) mCldn19<sub>cryst</sub> упорядочен и взаимодействует с С-CPE. Путем мутагенеза было установлено, что остатки mCldn19<sub>cryst</sub> N150-P154 (ECS2) и A39-I41 (ECS1) критичны для связывания с С-CPE. Боковые цепи остатков консервативного мотива N150-P154 простираются к С-CPE и плотно входят в гидрофобный карман С-CPE, образованный остатками Y306, Y310 и Y312. Для связывания с С-CPE остатки клаудинов, соответствующие N150-P154 mCldn19, должны быть незаряженными и гидрофобными (так, отрицательно заряженный остаток на месте N150 mCldn19<sub>cryst</sub> нарушал его связывание С-CPE). Таким образом, можно определить, является ли тот или иной клаудин мишенью для CPE. В случае мотива A39-I41 (ECS1) большую роль играет размер боковых цепей. Авторы полагают, что основную роль в образовании комплекса играет ECS2, тогда как ECS1 усиливает взаимодействие за счет увеличения площади гидрофобного контакта. Структура комплекса mCldn19<sub>cryst</sub>-С-CPE позволит конструировать лекарства и биомаркеры, специфичные для определенных клаудинов.

А. П. Корепанов

## Апоптоз и сродство к антигену ограничивают эффекторную дифференцировку отдельных наивных В-клеток

Apoptosis and antigen affinity limit effector cell differentiation of a single naïve B cell. Justin J. Taylor, Kathryn A. Pape, Holly R. Steach, Marc K. Jenkins. Science. 2015. Vol. 347. Vol. 6223. P. 784–787.

При контакте с антигеном наивные В-клетки дифференцируются в эффекторные клетки различных типов: производящие антитела плазматические клетки, клетки зародышевых центров и клетки памяти. Остается неизвестным, способны ли отдельные наивные В-клетки дифференцироваться по всем этим путям. В данном исследовании было установлено, что некоторые наивные В-клетки дифференцировались только в один из возможных типов, тогда как другие давали все возможные варианты. Была рассмотрена дифференцировка наивных В-клеток в процессе первичного иммунного ответа против антигена-белка APC (аллофиикоцианина). В селезенке и лимфатических узлах у мышей удавалось обнаружить 4 тыс. специфичных к APC наивных В-клеток через 7 дней после иммунизации APC с полным адьювантом Фройнда давших около 100 тыс. эффекторных клеток различных типов. С помощью окрашивания CFSE В-клеток до контакта с антигеном удалось отследить их деление при иммунизации и установить, что в рассматриваемых условиях иммунный ответ дают 33% APC-специфичных В-клеток. Для оценки потенциала отдельных наивных В-клеток был использован метод ограниченных разведений. Одной группе мышей пересаживали  $2 \times 10^6$  наивных В-клеток, другой группе – в 10 раз меньше. Через 7 дней после иммунизации у всех мышей, получивших  $2 \times 10^6$  клеток, донорские клетки успешно пролиферировали. При этом при пересадке  $2 \times 10^5$  клеток, донорские популяции сформировались в организме лишь у 19% мышей. Отдельные наивные В-клетки давали от 4 до 957 дочерних клеток (с медианой 16). Популяции наивных клеток реципиента давали эффекторные клетки всех типов, но 44% из них содержали клетки только одного типа. Способность дифференцироваться по различным путям была свойственна активно делившимся клональным популяциям. Средняя численность популяций с 4 типами эффекторных клеток составила 352 клетки, тогда как для популяций, состоящих из клеток только одного типа – 10 клеток. Связи между численностью популяции и процентом часто (7 раз и более) делившихся клеток обнаружено не было. В большинстве популяций, представлявших не все типы эффекторных клеток, содержалось в несколько раз меньше дочерних клеток, чем было предсказано методом окрашивания CFSE. Эти данные позволяют предположить, что размер популяции регулируется, главным образом, клеточной смертью. Отдельные APC-специфичные наивные В-клетки, лишенные медиатора апоптоза Bim, при иммунизации производили в 3,4 раза больше дочерних клеток, чем дикий тип. Они чаще давали начало популяциям с разнообразными типами эффекторных клеток. В их популяциях численность более сильно коррелировала с делением клеток, что объясняется пониженной интенсивностью апоптоза. Сродство к антигенам также повлияло на дифференцировку эффекторных клеток. *In vitro* при иммунизации антигенами высокого и среднего сродства клетки MD4 пролиферировали активнее, чем APC-специфичные В-клетки при воздействии APC. Описанные наблюдения позволяют предположить, что разнообразие типов эффекторных клеток формируется при первичном иммунном ответе в результате различий ответов отдельных наивных В-клеток.

А. Л. Братцева

## РНК-хеликаза DDX21 координирует транскрипцию и созревание рибосомных РНК

RNA helicase DDX21 coordinates transcription and ribosomal RNA processing. Eliezer Calo, Ryan A. Flynn, Lance Martin, Robert C. Spitale, Howard Y. Chang, Joanna Wysocka. Nature. 2015. Vol. 518. No 7538. P. 249–253.

РНК-хеликазы – консервативные ферменты, использующие энергию АТФ для преобразования структуры РНК и нуклеопротеинов. Хеликаза DDX21, один из белков данного семейства, участвует в функционировании РНК-полимераз I и II и задействована в контроле биогенеза рибосом. В регуляции транскрипции генов с участием РНК-полимераз I и II принципиальную роль играет хеликазная активность DDX21. Для того, чтобы охарактеризовать взаимодействия DDX21 с другими молекулами и ее функции в клетке были проведены исследования на клеточных культурах с применением флуоресцентных меток, и методов иммунопреципитации и высокопроизводительного секвенирования. В различных компартментах ядра эта РНК-хеликаза взаимодействует с некодирующими РНК. Только 1,1% РНК, связываемых DDX21, являются мРНК, ассоциированными также с функционированием рибосом. В ядрышках DDX21 связывается с транскрибируемой рРНК, участвует в процессе ее транскрипции, и созревания, а также контактирует с мякРНК. В нуклеоплазме DDX21 связывает 7SK РНК, компонент малого ядерного нуклеопротеина, взаимодействующего с ДНК на промоторах генов, транскрибируемых полимеразой II и кодирующих белки рибосом и мякРНК. Иммунопреципитация с последующим секвенированием показала, что DDX21 также связывается на этих участках в областях активного хроматина. 7SK в комплексе с белками HEXIM1/2 и P-TEFb подавляет экспрессию с промоторов РНК-полимеразы II. Связанная на промоторе DDX21 освобождает фактор элонгации P-TEFb из комплекса с 7SK малым рибонуклеопротеином и стимулирует транскрипцию контролируемых с его участием генов. В отсутствие 7SK РНК взаимодействие DDX21 с промоторами полимеразы II ослабевает, но на его сродстве к локусам рРНК в ядрышке это не сказывается. Нокаут DDX21 ведет к снижению транскрипции генов, на промоторах которых он связывается. С другой стороны, при ингибировании РНК-полимераз I и II DDX21 покидает ядрышко и регулируемые РНК-полимеразой II промоторы. В ядрышке DDX21 образует комплексы с рРНК, чаще всего их взаимодействие происходит в сайте метилирования 29-Оме или сайтах псевдоуридинилирования, модифицируемых нуклеопротеинами, содержащими мякРНК. По-видимому DDX21, взаимодействует с рРНК и модифицирующими ее нуклеопротеинами при созревании рРНК. Хотя наиболее полно охарактеризована роль DDX21 в регуляции ассоциированных с рибосомами генов, эта РНК-хеликаза также задействована в транскрипции с участием регулятора c-Junb. Кроме того, DDX21 обнаружен в комплексе с ДНК на сайтах, распознаваемых такими регуляторами роста и пролиферации клеток, как E2F, STAT1, NRF1 и ETS. Хеликаза DDX21 взаимодействует не только с РНК и ДНК. Белковые компоненты малых ядрышковых нуклеопротеинов также связываются с DDX21 не зависимо от присутствия РНК. Взаимодействие с белком XRN2, участвующим в созревании мякРНК, напротив, зависит от присутствия РНК в его составе. DDX21 – ключевой фермент, координирующий транскрипционные программы в различных компартментах ядра. Она взаимодействует с широким спектром молекул различной природы, координируя процессы, ведущие к формированию рибосом.

А. Н. Ваганова

## Полимераза $\theta$ стимулирует альтернативный путь негомологичного соединения концов и подавляет рекомбинацию у млекопитающих

Mammalian polymerase  $\theta$  promotes alternative NHEJ and suppresses recombination. Pedro A. Mateos-Gomez, Fade Gong, Nidhi Nair, Kyle M. Miller, Eros Lazzzerini-Denchi, Agnel Sfeir. Nature. 2015. Vol. 518. No 7538. P. 254–257.

Альтернативная система репарации ДНК путем негомологичного соединения концов участвует в возникновении геномных перестроек, некоторые из которых могут быть связаны с трансформацией клеток. Этот ведущий к ошибкам процесс репарации запускается при повреждении теломер и ведет к соединению концов хромосом. С использованием секвенирования нового поколения было описано встраивание нуклеотидов в местах разрыва при слиянии нефункциональных теломер, при котором выявляются изменения характерных для теломерных участков повторов TTAGGG. Исследование энзиматической активности, лежащей в основе подобных инсерций, выявило, что в данном процессе задействована ДНК-полимераза  $\theta$ . Подавление экспрессии этого фермента у мышей приводит к слияниям хромосом с поврежденными теломерами в нетеломерных регионах и активации гомологичной рекомбинации. Путем ингибирования ДНК-полимераз с низкой точностью было установлено, что ДНК-полимераза  $\theta$  участвует в альтернативном пути негомологичного соединения концов, но в классическом пути она не задействована. Для нее характерна низкая точность считывания и трансферазная активность, позволяющая достраивать нуклеотиды без матрицы. ДНК-полимераза  $\theta$  использует обе активности для стабилизации промежуточных структур при связывании концов ДНК и запуске альтернативного пути негомологичного соединения концов. Для исследования ее роли в клетке был проведен ряд экспериментов на клеточных культурах. Показано было, что после нокаута ДНК-полимеразы  $\theta$  падает не только частота сшивок поврежденных теломер, но и общая частота транслокаций в клетке. Расположенный на теломерах белок шелтрин защищает их от рекомбинации. В клетках, лишенных шелтрина, 10% теломерных участков подверглись действию альтернативного механизма негомологичного соединения концов. При нокауте в этих клетках ДНК-полимеразы  $\theta$ , активность этого механизма резко падала. Участие ДНК-полимеразы  $\theta$  в репарации двуцепочечных разрывов ведет к мутациям. В индуцированных лазером разрывах ДНК происходит накопление ДНК-полимеразы  $\theta$ , при этом она колокализуется с фосфорилированным гистоном H2AX. При нокауте PARP1 частота выявления колокализации снижалась, поскольку этот белок важен для привлечения ДНК-полимеразы  $\theta$  в область двуцепочечного разрыва ДНК. Как и процесс негомологичного соединения по альтернативному пути, репарация путем гомологичной рекомбинации характерна для фаз клеточного цикла S/G2. Оба механизма на начальных этапах используют белки MRE11 и CtIP20. Блокирование ДНК-полимеразы  $\theta$  способствует активации системы гомологичной рекомбинации, однако этот фермент важен для поддержания жизнедеятельности клеток, в которых механизмы репарации путем гомологичной рекомбинации нарушены. После утраты ДНК-полимеразы  $\theta$  клетками с неактивным Brca1 или Brca2 количество хромосомных аберраций возрастает, и жизнеспособность клеток снижается. Показано, что экспрессия ДНК-полимеразы  $\theta$  повышается в злокачественных опухолях, и она важна для выживания клеток с нарушением систем репарации путем гомологичной рекомбинации, а, значит, может стать мишенью для терапии опухолей, связанных с дисфункцией этой системы.

А. Н. Ваганова

## Синтаза жирных кислот подвергается предпочтительной деградации во время аутофагии при недостатке азота у дрожжей

Fatty acid synthase is preferentially degraded by autophagy upon nitrogen starvation in yeast. Tomer Shpilka, Evelyn Welter, Noam Borovsky, Nira Amar, Frida Shimron, Yoav Peleg, Zvulun Elazar. PNAS. 2015. Vol. 112. No 5. P. 1434–1439.

Аутофагия представляет собой основной внутриклеточный каталитический процесс в клетках эукариот, ответственный за разрушение органелл и больших агрегатов белков. Этот процесс индуцируется в условиях стресса, таких как, например, недостаток аминокислот, гипоксия и окислительный стресс. У дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* недостаток азота приводит к аутофагии, которая обеспечивает клетки свободными аминокислотами, необходимыми для биосинтеза белков. В течение долгого времени было принято считать, что аутофагия является неспецифичным процессом. Однако недавно были описаны случаи избирательной аутофагии. Белок Atg8 (autophagy-related protein 8) был идентифицирован как основной фактор аутофагии, необходимый для биогенеза аутофагосом. Было показано, что этот белок играет основную роль в избирательной аутофагии через рекрутирование им в аутофагосому транспортных белков. Синтаза жирных кислот (FAS) представляет собой большой комплекс ферментов, который участвует в синтезе C16- и C18-жирных кислот. FAS является жизненно необходимым комплексом, чье ингибирование приводит к быстрой утрате клеткой ее способности к выживанию в различных условиях роста. Синтаза жирных кислот состоит из двух субъединиц – Fas1 (Fas $\beta$ ) и Fas2 (Fas $\alpha$ ), которые располагаются в  $\alpha\beta\beta\beta$  макромолекулярном комплексе. Было показано, что удаление одной субъединицы приводит к деградации другой. Свободная субъединица Fas2 отличается коротким временем жизни и подвергается деградации протеасомами, в то время как деградация свободной субъединицы Fas1 происходит в процесс аутофагии. Также было показано, что комплекс синтазы жирных кислот доставляется в вакуоли в условиях недостатка калий ацетата. В настоящей работе авторы описали взаимодействия между специфичным для процесса аутофагии белком Atg8 и синтазой жирных кислот в клетках дрожжей, при котором N-концевой участок белка Atg8 взаимодействует с синтазой жирных кислот. В условиях азотистого голодания синтаза жирных кислот доставляется в вакуоль и подвергается там деградации при участии белков Vac8 (участвует в разрушении липидных пятен внутри клетки) и Atg24 (белок, участвующий в транспорте из ранних эндосом в поздние структуры комплекса Гольджи) после взаимодействия с белком Atg8. Деградация синтазы жирных кислот необходима для выживания клеток в условиях недостатка азота. Результаты настоящей работы свидетельствуют о том, что при азотистом голодании специфические белки предпочтительно доставляются в аутофагосомы и подвергаются там разрушению. Авторы представили доказательства того, что неспособность клеток разрушать синтазу жирных кислот в условиях азотистого голодания может привести к гибели клеток, в то время как низкая активность синтазы жирных кислот обеспечивает выживаемость клеток. Таким образом, необходимо поддерживать тонкий баланс уровня синтазы жирных кислот для выживания клеток в условиях азотистого голодания.

И. М. Мохосоев

## Митофагия обеспечивает устойчивость к опосредованной сидерофорами патогенности *Pseudomonas aeruginosa*

Mitophagy confers resistance to siderophore-mediated killing by *Pseudomonas aeruginosa*. Natalia V. Kirienko, Frederick M. Ausubel, Gary Ruvkun. PNAS. 2015. Vol. 112. No 6. P.1821–1826.

Выработка бактериями токсинов и факторов вирулентности, нарушающих основные процессы в организме хозяина, составляет основу их патогенности. Связывающий железо сидерофор пиовердин – основной фактор вирулентности опасного для человека патогена *Pseudomonas aeruginosa*. Пиовердин не только способствует размножению бактерий за счет захвата железа, но и проявляет токсичность. Механизм его действия до сих пор не установлен. В данном исследовании была выдвинута гипотеза о захвате сидерофорами железа из внутриклеточных ресурсов, обуславливающим их токсичность. Для проверки этого предположения червей *Caenorhabditis elegans* на 24 часа помещали в бесклеточную богатую пиовердином среду для выращивания бактерий. Методом флуоресцентной спектроскопии было показано, что пиовердин эффективно проникает в органы *C. elegans*. Воздействие очищенного пиовердина на *P. aeruginosa* приводило к гибели червей. Далее исследовали изменения экспрессии генов *C. elegans* в ответ на инфекцию *P. aeruginosa*, воздействие пиовердина и синтетического фенантролина, хелирующего (т.е. связывающего) железо. Во всех трех активировались гены, зависимые от факторов гипоксии. При инфицировании *Escherichia coli*, *P. aeruginosa* с нарушенным биосинтезом пиовердина, а также в среде без пиовердина эти гены не активировались. Удалось установить, что хелирование железа нарушает гомеостаз митохондрий и приводит к митофагии – деградации поврежденных митохондрий лизосомами. Для исследования гомеостаза митохондрии червей маркировали зеленым флуоресцентным белком. Помещение *C. elegans* в жидкую среду с *P. aeruginosa* привело к разрушению их митохондрий с образованием округлых телец. Подобная фрагментация митохондрий наблюдалась и при добавлении частично очищенного пиовердина или фенантролина к изначально безопасной среде с *E. coli*. Мембранный потенциал митохондрий под действием хелирующих агентов фенантролина, циклопироксоламина и DMSO оценивали с помощью чувствительного к изменениям потенциала красителя MitoTracker Red. Слабое окрашивание при связывании железа во всех трех случаях свидетельствовало о сбое потенциала. Утилизацию поврежденных митохондрий выявляли с помощью нечувствительного к потенциалу митохондриального красителя 10-нонил-акридинового оранжевого. Так, при недостатке железа наблюдалось ослабленное окрашивание, что говорит о снижении массы митохондрий. Эти наблюдения согласовывались с данными количественной ПЦР – на 20% снизилось количественное отношение митохондриального генома к ядерному. Инактивация генов митофагии препятствовала фрагментации митохондрий при недостатке железа, т.е. чувствительность к связыванию железа коррелировала с нарушениями митофагии. Характер экспрессии генов регуляторов биогенеза митохондрий говорит о сохранении этого процесса при дефиците железа: уровень экспрессии PGC-1 $\alpha$  под действием хелирующих агентов повысился, уровень NRF1 и NRF2 не изменился. Аналогичные результаты были получены и на клетках млекопитающих. Таким образом, митофагия защищает *C. elegans* от действия *P. aeruginosa* и хелирующих агентов, что говорит о ее роли во врожденном иммунном ответе.

А. Л. Братцева

## PTP $\sigma$ функционирует как пресинаптический рецептор комплекса глипикан-4/LRRTM4, и имеет важное значение для возбуждающей синаптической передачи

PTP $\sigma$  functions as a presynaptic receptor for the glypican-4/LRRTM4 complex and is essential for excitatory synaptic transmission. Ji Seung Ko, Gopal Pramanik, Ji Won Um, Ji Seon Shim, Dongmin Lee, Kee Hun Kim, Gug-Young Chung, Giuseppe Condomitti, Ho Min Kim, Hyun Kim, Joris de Wit, Kang-Sik Park, Katsuhiko Tabuchi, Jaewon Ko. PNAS. 2015. Vol. 112. No 6. P. 1874–1879.

PTP $\sigma$  (протеин-тирозинфосфатаза  $\sigma$ ) — это адгезионная молекула, которая принимает участие в развитии синапсов. В качестве лиганда для этой молекулы выступает глипикан-4. Для молекулярного взаимодействия PTP $\sigma$  и глипикана-4 необходим гепарансульфат. Обнаружено, что LRRTM4 (трансмембранный белок 4 с повтором, богатым лейцином) индуцирует пресинаптическую дифференциацию через взаимодействие PTP $\sigma$  и глипикана-4. Гепарансульфат-связывающая способность PTP $\sigma$  имеет решающее значение для синаптической передачи в нервной системе. Это расширяет понимание того, как пути синаптической адгезии регулируют развитие возбуждающих синапсов, и проливает свет на глипикан-4/LRRTM4 трансинаптическую передачу сигнала. В данном исследовании были проведены биологические анализы клеток с использованием специальных экспрессирующих конструкций и антител. Для изучения экспрессии матричной РНК глипикана в мозге крыс использовали рекомбинантные лентивирусные плазмиды. В культуре нейронов гиппокампа были сделаны электрофизиологические записи. Основной задачей настоящего исследования являлось изучение значимости взаимодействия синаптических белков в нейронах млекопитающих. В результатах исследования подчеркивается, что глипикан-4 является потенциальным лигандом для PTP $\sigma$ . Их взаимодействие происходит через иммуноглобулиновые домены PTP $\sigma$  и является гепарансульфат-зависимым. Показано, что все эти процессы происходят в той же самой клеточной мембране. Имобилизованные иммуноглобулиновые домены PTP $\sigma$  эффективно взаимодействуют только с расщепленными протеолитическими ферментами глипиканом-4. Сама же PTP $\sigma$  в головном мозге крыс формирует дополнительный комплекс с LRRTM4. Кроме того, один нокдаун мутантной PTP $\sigma$  в культуре нейронов значительно сокращает синаптическую активность LRRTM4, а также частоту и амплитуду сигнала в ходе синаптической передачи. Этот эффект может быть обращен обратно, если использовать PTP $\sigma$  дикого типа. Говоря о значении гепарансульфат-связывающей последовательности PTP $\sigma$  для возбуждающей синаптической передачи, авторы статьи, проведя эксперименты на культуре нервных клеток, доказали, что взаимодействие PTP $\sigma$  с глипиканом-4 гепарансульфат-зависимым образом направлено на развитие и функционирование возбуждающих синапсов. Результаты показывают, что способность PTP $\sigma$  связываться с гепарансульфатом инициирует многогранные сигнальные пути в пресинаптических нейронах, которые оказывают влияние на различные аспекты развития возбуждающих синапсов. Одним из основных остается вопрос, как гепарансульфат-связанная PTP $\sigma$  способствует развитию синапса. Данные настоящей работы предполагают, что гепарансульфат-связанная пресинаптическая PTP $\sigma$  индуцирует образование многомерных комплексов с различными постсинаптическими лигандами, способствуя тем самым динамической модуляции пресинаптической структуры. Кроме того, гепарансульфат-связанная PTP $\sigma$  может вызывать активацию конкретных путей синаптической адгезии с помощью различных синаптических лигандов.

*Н. В. Карпов*

## Контекстно-зависимое категориальное восприятие у певчих птиц

Context-dependent categorical perception in a songbird. Robert F. Lachlan, Stephen Nowicki. PNAS. 2015. Vol. 112. No 6. P. 1892–1897.

У певчих птиц есть когнитивные особенности, которые присутствуют и в человеческой речи. Постоянная изменчивость песен болотных воробьев, например, воспринимающаяся в категориальной форме, схожа с восприятием человеком фоном — мельчайших единиц речи. Малоизвестным является факт, что многие фонематические категории в речи изменяют свою структуру и восприятие в зависимости от лингвистического контекста. В данном исследовании было изучено, как категориальное восприятие у болотных воробьев меняется под воздействием контекста, и показано, что один и тот же тип песенной записи классифицируется различно в зависимости от его позиции внутри песни. Был записан и проанализирован песенный репертуар 307 самцов болотных воробьев из двух популяций. Эксперименты проводились в полевых условиях с помощью протоколов, которые изучали особенности восприятия у болотных воробьев. Записи птичьих песен были сгруппированы в соответствии с их акустической структурой. Статистическая обработка выделила 10 популяционных типов записей. Одним из признаков речи является тот факт, что лингвистический контекст влияет на то, как звуки речи делятся на фонемы, и то, как различные версии фоном впоследствии произносятся. Авторы статьи подтверждают, что болотные воробьи категориально воспринимают записи спетых ими песен. Что еще более важно, результаты демонстрируют, что категоризация типов записей является более сложной, чем считалось ранее. Изучив, как три связанных между собой типа записей были восприняты, авторы установили, что один и тот же «промежуточный» тип записи относится к категории «короткого» типа, когда он воспроизводится в начале песни, и к «длинному» типу — когда он воспроизводится в конце песни. В целом, три воспроизведенных типа записей, спетых птицами Пенсильвании, как показывают дискриминационные и маркировочные эксперименты, лежат в основе двух воспринятых категорий, границы которых зависят от положения записи в той или иной части песни. Предполагается, что короткие и длинные записи аллофонов находятся в комплементарном распределении, то есть оба типа записей могут принадлежать к одной и той же категории, но не могут быть в том же контексте. Таким образом, у певчих птиц, как и в речи человека, категориальное восприятие зависит от контекста, и, как в случае с человеческой фонологией, существуют сложные отношения между основными категориальными представлениями и поверхностными формами. В связи с этим, результаты предполагают, что фонологический комплекс может развиваться даже в отсутствие богатых лингвистических компонентов, таких как синтаксис и семантика. Однако, в отличие от человеческой речи болотные воробьи не используют эту сложную фонологическую систему для построения системы коммуникации с символическими значениями и грамматическими комплексами. Таким образом, механизмы, лежащие в основе фонологического комплекса, могут брать свое происхождение в логике оценки сигналов, которые управляют коммуникацией многих животных.

*Н. В. Карпов*

## Регуляция гена *fim3* *Bordetella pertussis* с участием VvgA: фосфорилирование контролирует формирование неактивного или активного транскрипционного комплекса

*Bordetella pertussis* *fim3* gene regulation by VvgA: Phosphorylation controls the formation of inactive vs. active transcription complexes. Alice Boulanger, Kyung Moon, Kimberly B. Decker, Qing Chen, Leslie Knippling, Scott Stibitz, Deborah M. Hinton. PNAS. 2015. Vol. 112. No 6. E526–E535.

Двухкомпонентные системы, включающие сенсорную киназу и регулятор — механизм адаптации микроорганизмов к изменениям окружающей среды. Факторы вирулентности *Bordetella pertussis*, коклюшный токсин и адгезины, находятся под контролем двухкомпонентной системы VvgAS. Киназа VvgS активируется в культуре при 37 °C, и осуществляемое ею фосфорилирование VvgA ведет к изменению профиля экспрессии порядка 100 генов. Гены, регулируемые данной системы, находятся под промоторами, различными по структуре, что определяет время экспрессии генов ранних и поздних факторов вирулентности. Особенности взаимодействия регулятора VvgA с промотором P<sub>fim3</sub>, регулирующим экспрессию фимбрий в начале инфекции были описаны с помощью проведения реакции транскрипции бесклеточной системе. Исследования проводились с использованием как с использованием полимеразы *B. pertussis*, так и формирующей более стабильные открытые комплексы с ДНК РНК-полимеразы *E. coli*. Как фосфорилированная, так и нефосфорилированная формы VvgA образуют комплексы с РНК-полимеразой на промоторе P<sub>fim3</sub>. При этом комплексы РНК-полимеразы и VvgA, содержащие фосфорилированные молекулы VvgA, взаимодействуют с ДНК в трех сайтах, а нефосфорилированные — только в двух. В обоих случаях происходит расхожде-

ние цепей ДНК в составе комплекса и синтез РНК, но формирующиеся в отсутствие фосфорилирования комплексы инициации транскрипции нефункциональны, они синтезируют только короткие РНК, различного размера. На основании полученных в ходе исследования данных была сформулирована модель регуляции экспрессии двухкомпонентной системой VvgAS. Фосфорилированные молекулы VvgA присутствуют в растворе в виде димеров и мономеров, а нефосфорилированные — только в мономерном состоянии. В отсутствие стимулирующего сигнала в клетке поддерживается невысокий уровень экспрессии VvgS и VvgA. При активации VvgS внешними сигналами происходит фосфорилирование VvgA, ведущее к его димеризации. Благодаря особенностям конформации комплекса РНК-полимеразы и фосфорилированного димеризованного регулятора, становится возможной транскрипция ранних факторов вирулентности с таких промоторов как P<sub>vvgA/S</sub>, P<sub>fim3</sub> и P<sub>fhaB</sub>, при этом содержание VvgA в клетке повышается, причем присутствует как фосфорилированная, так и нефосфорилированная форма белка. Повышение содержания фосфорилированной формы VvgA стимулирует экспрессию поздних факторов вирулентности. В это время накопление нефосфорилированной формы VvgA на промоторах генов ранних факторов вирулентности приводит к формированию подавляющих экспрессию комплексов. Таким образом, нефосфорилированный VvgA действует как репрессор. Когда микроорганизм попадает в условия, в которых стимулирующие сигналы отсутствуют, содержание фосфорилированного VvgA быстро падает из-за нестабильности связи с фосфатом и фосфатазной активности VvgS, однако высокое содержание нефосфорилированного белка сохраняется дольше, оказывая подавляющее влияние на экспрессию генов факторов вирулентности. Описанный механизм работы объясняет быстрое и многоуровневое осуществление регуляции экспрессии двухкомпонентной системой VvgAS.

А. Н. Ваганова

## Термитники могут увеличить устойчивость экосистем засушливых земель к климатическим изменениям

Termite mounds can increase the robustness of dryland ecosystems to climatic change. Juan A. Bonachela, Robert M. Pringle, Efrat Sheffer, Tyler C. Coverdale, Jennifer A. Guyton, Kelly K. Caylor, Simon A. Levin, Corina E. Tarnita. *Science*. 2015. Vol. 347. No 6222. P. 651–655.

Во многих исследованиях, посвященных характеру распространения растительности в экосистемах с ограниченными ресурсами, отмечается наличие пространственной самоорганизации растений, которая описывается моделями обратной связи, зависящей от масштаба (models of scale-dependent feedback, SDF). В частности, в условиях аридных и семиаридных саванн и степей (экосистемы засушливых земель) растения группируются в кластеры, внутри которых инфильтрация влаги в почве повышается. Таким образом группы растений более эффективно собирают воду в определенном радиусе вокруг своего кластера, конкурируя за водный ресурс с соседними кластерами. По мере уменьшения количества осадков (например, в связи с климатическими изменениями), размеры и количество кластеров сокращаются, и ландшафт приобретает характерный пятнистый рисунок растительного покрова, свидетельствующий о начале опустынивания территории. Авторы использовали математическое моделирование для оценки роли термитов в увеличении устойчивости экосистем засушливых земель и замедлении наступления пустынь. Изучив постройки термитов, авторы выяснили, что термитники удерживают питательные вещества и влагу, а благодаря внутренним туннелям в термитниках вода лучше проникает в почву, а не испаряется с поверхности. Кроме того, нарушая гомогенность субстрата, термиты увеличивают проницаемость почвы, делая ее более пригодной для растительности. Исследование также показало, что в период засухи в термитниках могут дольше сохраняться семена растений, которые дают всходы после дождя. Предметом исследования были термиты рода *Odontotermes*, однако авторы утверждают, что выводы справедливы для всех типов термитов, способствующих лучшей проницаемости почвы внутри и вокруг своих гнезд. В итоге, вокруг термитников процветает растительная жизнь, которая в противном случае была бы под угрозой вымирания. При наличии большого количества построек даже засушливые степные ландшафты, обладающие пятнистым рисунком распространения растительности, намного дольше противостоят опустыниванию. Учитывая масштабы распространения термитников в Африке, Азии и Южной Америке, можно говорить о том, что термиты играют важную роль в стабилизации экосистем засушливых земель в условиях глобальных климатических изменений. Ландшафты же засушливых земель занимают более 40% поверхности Земли, и в их пределах проживает более 38% населения планеты. По сути, термиты играют решающую роль в экосистемах подобных регионов, помогая поддерживать жизнь не только растений, но также больших и малых диких животных. Результаты исследования показывают, что климатические SDF-модели должны более полно учитывать роль таких организмов как термиты, муравьи и земляные черви, которые создают вокруг себя специфическую среду обитания, отличающуюся от окружающего субстрата не только механическими свойствами, но и наличием большого количества питательных веществ, – своеобразные «островки плодородия».

*В. В. Стрекопытов*

## Загрязнение океанов пластиковыми отходами с суши

Plastic waste inputs from land into the ocean. Jenna R. Jambeck, Roland Geyer, Chris Wilcox, Theodore R. Siegler, Miriam Perryman, Anthony Andrady, Ramani Narayan, Kara Lavender Law. *Sciencemag*. 2015. Vol. 347. No 6223. P. 768–771.

В прошлом неактивные и разлагаемые отходы закапывали в землю или сжигали, однако увеличение доли синтетических пластиков в отходах требует новой парадигмы утилизации. Несмотря на то, что влияние пластиковых отходов на водную среду широко задокументировано, и первые упоминания относятся к 1970-м годам, сегодня все еще нет точных оценок источников пластикового мусора в водной среде или количества пластика, поступающего в виде отходов с суши. Известно, что в связи с развитием коммерции, возросло и производство пластика. Он используется, как правило, для упаковки, т.е. является материалом, предназначенным для последующего уничтожения. Пластик в водной среде представляет опасность из-за негативного воздействия на океаны, их флору и фауну и, потенциально, на человека. Пластиковые отходы встречаются на побережьях, во льдах Арктики, на поверхности и на дне морей. В результате разложения пластиковых отходов возникают частицы, которые способны проглотить даже мелкие беспозвоночные. Из-за мелких размеров частиц сложно отследить их источник, поэтому, наиболее эффективным способом борьбы с загрязнениями является их предупреждение. Авторы предлагают принципиальную схему расчета неправильно утилизируемых пластиковых отходов, ежегодно производимых населением всех стран, живущим в пределах 50 км от моря. Для каждой из 192 прибрежных стран, омываемых Атлантическим, Тихим или Индийским океанами, а также Средиземным и Черным морями принципиальная схема включает следующие параметры: 1) масса отходов, производимых ежегодно на душу населения; 2) процент пластика в отходах; 3) процент неправильно утилизированных пластиковых отходов, которые могут попасть в водную среду. Схему, предложенную авторами, также можно использовать для оценки факторов, определяющих самые крупные источники отходов, загрязняющие океаны по всему миру. В результате анализа выяснилось, что лидерами по производству отходов являются развивающиеся страны со средним уровнем достатка и еще не развитой инфраструктурой утилизации отходов. Развитие данной инфраструктуры потребует значительных затрат средств и времени, однако при отсутствии улучшений в сфере утилизации отходов, кумулятивное количество пластиковых отходов, поступающих с суши в водную среду вырастет на порядок уже к 2025 г. Авторы считают, что уровень отходов достигнет своего пика лишь к 2100 г., а до тех пор количество отходов будет увеличиваться с ростом экономики, численности населения прибрежных стран и его потребления. Перспективными решениями данной проблемы являются: снижение уровня отходов и такие стратегии утилизации, как расширенные системы по регенерации отходов и увеличению обязанностей производителей. Улучшение инфраструктуры переработки отходов в развивающихся странах имеет первостепенное значение и потребует ресурсов и времени. Пока такие схемы разрабатываются, индустриальные страны могут принять немедленные меры, снизив уровень отходов и ограничив рост производства пластика розового применения.

*Н. Ю. Колесникова*

## Планетарные границы — зоны безопасного развития человечества на Земле

Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Will Steffen, Katherine Richardson, Johan Rockström, et. al. Science. 2015. Vol. 347. No 6223. P. 736 (1259855-1–10).

Основываясь на характеристиках биофизических процессов, лежащих в основе стабильности системы Земля, концепция планетарных границ определяет пространство безопасной деятельности человека на планете. Данное исследование проводилось с целью проверки состояния параметров планетарных границ, положенных в основу концепции в статье того же коллектива ученых, опубликованной в 2009 г. Полученные за прошедшие 5 лет новые данные биофизических наук позволили произвести более точную оценку устойчивости глобальной экосистемы. По сравнению с предыдущим исследованием, были применены некоторые методологические новшества, в частности, — комплексный подход к оценке границ, основанный на учете взаимного влияния факторов, а также анализ географической неоднородности ситуации по ряду параметров. Были выявлены две ключевые границы — изменение климата и целостность биосферы. Существенное и продолжительное нарушение даже одной из них может привести к сдвигу в состоянии всей глобальной экосистемы. В статье подробно описываются принципы количественной оценки параметров состояния по каждой из 9 планетарных границ — изменение климата, целостность биосферы, биогеохимические циклы азота и фосфора, изменение экосистем суши в результате природопользования, потребление пресной воды, истощение озонового слоя стратосферы, закисление океана, выбросы аэрозолей в атмосферу и химическое загрязнение окружающей среды новообразованными соединениями. Делается вывод о том, что человечество уже нарушило 4 планетарные границы из 9. К трем уже зафиксированным в 2009 г. нарушениям границ (изменение климата, уровень потери биоразнообразия (прежнее название границы «целостность биосферы») и изменение глобального цикла азота) добавилось четвертое — изменение экосистем суши. Здесь, прежде всего, оценивался параметр сокращения лесных площадей по сравнению с уровнем доиндустриальной эпохи вместо ранее использовавшегося параметра роста пахотных площадей. Превысил предельный уровень и второй параметр границы биогеохимических циклов — количество фосфора, попадающего с полей в реки, а затем и в океан. В качестве базового уровня для всех параметров был принят уровень значений голоценовой (доиндустриальной) эпохи, а в качестве граничного значения — уровень, превышение которого с большой долей вероятности повлечет за собой риск дестабилизации экосистемы. Для некоторых планетарных границ также введено понятие пороговых значений, достижение которых быстро сдвигает систему в зону риска. Природными параметрами, определяющими пороговые значения, могут быть, к примеру, темпы таяния полярных льдов, объем тропических лесов Амазонии, растворимость арагонита в приповерхностных водах Мирового океана, уровень аэрозолей в атмосфере (на региональном уровне) и южно-азиатские муссоны. Для оценки параметров планетарных границ использовались данные общих и научных публикаций, отчетов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC), Международной геосферно-биосферной программы (IGBP). Некоторые анализы были проведены специально для данного исследования.

*В. В. Стрекопытов*

## Обусловленный климатом упадок коралловых рифов сменяется постепенным восстановлением их потенциала

Predicting climate-driven regime shifts versus rebound potential in coral reefs. Nicholas A. J. Graham, Simon Jennings, M. Aaron MacNeil, David Mouillot, Shaun K. Wilson. Nature. 2015. Vol. 518. No 7537. P. 94–97.

В середине-конце 1990-х гг. коралловые рифы во всем мире стали погибать: кораллы выцветали, переставали расти и умирали, рифовые постройки разрушались. Масштабы гибели рифов были катастрофическими. В Карибском море и в Тихом океане погибло более 50%, а на Сейшельских островах — до 90% всех рифовых построек. Вероятной причиной «коралловой катастрофы» считается совпадение по времени двух температурных аномалий в водах Мирового океана — усиление Эль-Ниньо в Тихом океане и явление Индоокеанского диполя (Indian Ocean Dipole), которые привели к резкому повышению температуры приповерхностной воды в глобальном масштабе. Авторы вели наблюдения на рифах Сейшельских островов с 1994 года. В то время рифы еще находились в отличном состоянии. В 1998 году, когда кораллы стали выцветать и умирать, в последующие годы, когда разрушилось до 90% рифовых построек, и вплоть до настоящего времени эта работа продолжалась. По результатам наблюдений была составлена динамическая картина эволюции экосистемы коралловых рифов до, во время и после катастрофы. В первую очередь ученые обращали внимание на конкуренцию между кораллами и водорослями. Когда коралловая постройка разрушается, дальнейшая ее судьба может быть двоякой: либо риф восстанавливается, либо его заселяют макрофиты, которые укореняются на бывших коралловых субстратах. На водорослевых полях кораллы уже не появляются. По-видимому, там трудно закрепиться молодым полипам, которые не могут конкурировать с водорослями. Используемая методика предполагала оценку состояния каждого из рифов по набору 8–16 учетных площадок размером примерно 7 м в диаметре. На каждой из них единообразно подсчитывались площадь, занятая рифостроителями (кораллами) и водорослями, а также численность других обитателей, в том числе учитывалось разнообразие рыб. Из 21 изученного рифа 12 к настоящему времени практически полностью восстановились и были покрыты новыми полипами. Скорость восстановления кораллов на этих 12 рифах в первые 7–8 лет после катастрофической гибели была низкой, затем, после 2005 года, темпы восстановления быстро увеличились. Это ускорение авторы относят на счет достижения пороговых характеристик пополнения, необходимых для восстановления локальных поселений. Другие 9 рифов постепенно, с постоянной скоростью, зарастали водорослями, в результате чего их облик полностью изменился. Было установлено, что быстрее восстанавливаются рифы, расположенные на большей глубине, где температура ниже и где до катастрофических событий коралловые постройки были сложнее и разнообразнее. Дополнительными факторами, оказывающими влияние на состояние коралловых рифов, являются: биогенное загрязнение (чем оно выше, тем больше вероятность зарастания рифов водорослями) и численность растительноядных рыб (их обилие, наоборот, препятствует зарастанию). Данное исследование говорит о возможности естественного восстановления потенциала и биоразнообразия значительной части рифов, погибших в период «коралловой катастрофы».

*В. В. Стрекопытов*

## Повторное наполнение поверхностными талыми водами подледного озера на северо-востоке Гренландии

Recharge of a subglacial lake by surface meltwater in northeast Greenland. Michael J. Willis, Bradley G. Herried, Michael G. Bevis, Robin E. Bell. Nature. 2015. Vol. 518. No 7538. P. 223–227.

По мере потепления климата ожидается увеличение стока талых вод с поверхности ледниковых щитов. Эти воды, поступая в базальную часть гляциальной системы, могут оказывать серьезное влияние на характер динамики ледникового покрова, вызывая увеличение скорости его движения, обусловленное снижением базального трения. С другой стороны, талые воды по каналам субгляциальной гидросистемы могут быстро достигать края ледника и, разгружаясь в океан, влиять на характер циркуляции в фьордах и темпы таяния подводных частей ледников. Менее изученным остается механизм накопления и консервации талых вод в субгляциальных озерах, расположенных под ледниковым покровом. Авторы наблюдали, как крупное подледное озеро, находящееся под южной вершиной ледниковой шапки Flade Isblink на северо-востоке Гренландии быстро опустошалось, а затем снова наполнялось поступающей с поверхности талой водой. Так, осенью 2011 г. произошло резкое осушение субгляциального озера, имевшего максимальную глубину 70 м, с разгрузкой 0,4 км<sup>3</sup> содержащейся в нем воды в ближайший фьорд. Затем, в течение последующих 2 лет, происходил быстрый подъем уровня дна этого подледного бассейна площадью 8,4 км<sup>2</sup>. При этом имело место повторное наполнение озера талыми водами, поступающими с поверхности по системе расселин. Для изучения совместной эволюции поверхности ледниковой шапки и скрытой под ней базальной гидрологической системы была построена численная модель высотных отметок, основанная на результатах спутниковой стереосъемки и авиабортовых измерений. Периодически происходящие наполнения и опустошения озера, наблюдавшиеся уже дважды за последние два года, авторы объясняют тем, что собранная в озере теплая талая вода, обладающая повышенной энтальпией и латентной теплотой, вызывает размягчение окружающего базального льда, изменяет его реологические свойства и способствует активизации его движения. Ледниковые подвижки приводят к раскрытию каналов, через которые сливается вода. Ранее считалось, что расположенные подо льдом озера не подвергаются никаким внешним воздействиям и долгое время остаются в стабильном состоянии. Авторы считают, что наблюдение за дальнейшей судьбой этого озера поможет лучше изучить режим движения талой воды в субгляциальной гидросистеме Гренландии. В настоящее время в Гренландии известны 2 субгляциальных озера с подобным режимом. В целом же под ледниковым покровом острова может скрываться до 400 и более таких озер, наполняющихся талой водой из супрагляциальной системы. Если это так, то окружающий их базальный лед обладает более высокими температурой и вязкостью, чем считалось ранее. При построении прогнозных моделей поведения ледникового покрова в условиях глобального потепления надо учитывать и периодический дополнительный привнос тепла в субгляциальную систему, связанный с поступлением и временной консервацией в подледных озерах теплой талой водой.

*В. В. Стрекопытов*

## Боро-изотопные свидетельства поступления в атмосферу океанского диоксида углерода в период последнего отступления ледников

Boron isotope evidence for oceanic carbon dioxide leakage during the last deglaciation. M. A. Martínez-Botí, G. Marino, G. L. Foster, P. Ziveri, M. J. Henahan, J. W. B. Rae, P. G. Mortyn, D. Vance. Nature. 2015. Vol. 518. No 7538. P. 219–222.

Район современного Южного океана является зоной мощного апвеллинга (подъема) глубинных вод, обогащенных углеродом и различными питательными веществами. В приповерхностной зоне океана происходит частичное поглощение углерода биосистемой, а оставшееся его количество дегазируется в виде CO<sub>2</sub> в атмосферу. Для понимания особенностей цикла углерода и его влияния на климатическую систему важно выяснить характер флуктуаций содержаний атмосферного CO<sub>2</sub> в масштабах ледниковых/межледниковых периодов. Главным фактором, влияющим на содержание диоксида углерода в атмосфере на протяжении всего ледникового цикла, считается баланс углерода в океане. Процесс же накопления/высвобождения океанского углерода обусловлен, прежде всего, интенсивностью глубинной вентиляции Южного океана. При моделировании этого процесса принимается, что в периоды глобального оледенения глубинная циркуляция океана ослабевает, усиливается стратификация водной колонны, что приводит к замыканию глубоководного резервуара CO<sub>2</sub>. Параллельно растет мощность биологического «насоса» в связи с активизацией океанского цикла Fe, играющего роль питательного вещества приповерхностной биосистемы. Совместное действие двух этих факторов приводит к сокращению поступления океанского CO<sub>2</sub> в атмосферу. В период же отступления ледников (период дегляциации) замкнутый глубоководный резервуар CO<sub>2</sub> снова соединяется с атмосферой, что приводит к росту содержаний атмосферного CO<sub>2</sub>. Данное утверждение делается на основе анализа ледяного керна. Однако для достоверной реконструкции океанского цикла углерода в периоды дегляциации не хватает прямых измерений или прокси-данных (косвенных индикаторов палеоклимата), позволяющих оценить объем поступления углерода из приповерхностных вод океана в атмосферу. Радиоуглеродная активность (Δ<sup>14</sup>C) дает возможность отследить изменение темпов океанской циркуляции, но ничего не говорит о содержании углерода в морской воде. А прокси-данные, фиксирующие нарастание апвеллинга в период дегляциации, не позволяют установить, какой процент из поднятого с глубин углерода дегазировался в атмосферу, а какой остался в биосистеме океана. В качестве более достоверного индикатора объемов CO<sub>2</sub>-дегазирования океана авторы предложили использовать рН прокси-данные, полученные на основе изотопного анализа бора (δ<sup>11</sup>B) в образцах планктонных фораминифер из керна, взятого в субантарктической части Атлантики и в восточной экваториальной части Тихого океана. И в одном, и в другом случаях зафиксировано «избыточное» закисление вод океана в период последней дегляциации и в раннем голоцене. Результаты анализа показывают, что апвеллинг, способствовавший вентиляции глубинных зон Южного океана, был одним из важнейших источников поступления дополнительного углерода в атмосферу Земли в период последнего отступления ледников. Однако не исключено, что в других частях планеты действовали и иные процессы, приводящие к росту концентраций CO<sub>2</sub> в атмосфере в межледниковый период.

*В. В. Стрекопытов*

## Радиоактивный шлейф от аварии на АЭС Фукусима достиг континентальных вод Северной Америки

Arrival of the Fukushima radioactivity plume in North American continental waters. John N. Smith, Robin M. Brown, William J. Williams, Marie Robert, Richard Nelson, S. Bradley Moran. PNAS. 2015. Vol. 112. No 5. P. 1310–1315.

В результате аварии на АЭС Фукусима–Дайичи (Япония), произошедшей 11 марта 2011 г. из-за разрушительного действия цунами, в воды Тихого океана и в атмосферу было выброшено  $10\text{--}30 \times 10^{15}$  Бк изотопа  $^{137}\text{Cs}$ . Максимальная концентрация этого вещества ( $68 \times 10^6$  Бк/м<sup>3</sup>) в морской воде у берегов Японии была зафиксирована 6 апреля 2011 г. Затем шлейф радиоактивного загрязнения стал быстро распространяться к востоку вместе с водами течений Ояшио и Курошио. Серьезную обеспокоенность вызвало распространение шлейфа этих веществ в сторону североамериканского побережья. В работе приводятся результаты первого системного изучения переноса радиоактивных веществ в северной Пацифике. Замеры производились с борта канадского океанографического судна CCGS John P. Tully в 2011–2014 гг. В качестве маркера использовалось изотопное отношение  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ , так как изотоп  $^{134}\text{Cs}$  имеет очень короткий период полураспада (2,1 года) и любое его присутствие в морской воде однозначно связано с заражением от аварии на Фукусиме. На основе анализа изотопов цезия  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  было выявлено, что к июню 2012 г. (то есть через 1,3 года после аварии) граница радиоактивного шлейфа находилась в 1500 км к западу от побережья Британской Колумбии (Канада). К июню 2013 г. сигнал распространился уже на континентальный шельф Канады, а к февралю 2014 г. радиоактивность верхних 150 м водной колонны у североамериканского побережья составила 2 Бк/м<sup>3</sup>, что вдвое больше, чем после выпадения атмосферных радиоактивных осадков при испытаниях ядерного оружия в Тихом океане. Сделанные расчеты, результаты которых совпадают с данными, полученными на основе моделирования океанской циркуляции, показывают, что суммарное содержание  $^{137}\text{Cs}$  (последствия аварии на АЭС Фукусима и радиоактивные осадки) у берегов всей Северной Америки, от Аляски до Калифорнии, к 2015–2016 гг. достигнет максимального значения 3–5 Бк/м<sup>3</sup>, а затем начнется его медленное снижение. Естественный фоновый уровень в 1 Бк/м<sup>3</sup> будет достигнут только к 2021 г. В то же время, даже максимальные значения концентраций  $^{137}\text{Cs}$ , полученные авторами работы, не представляют угрозы для окружающей среды, морской фауны или здоровья человека. Они сопоставимы со значениями фоновых концентраций  $^{137}\text{Cs}$ , наблюдавшихся в регионе в 1980-х годах. В целом же, естественный фон  $^{137}\text{Cs}$  в восточной части Тихого океана плавно понижался от 20 Бк/м<sup>3</sup> в 1960-х годах, когда массово проводились испытания ядерного оружия, до 1,5 Бк/м<sup>3</sup> в 2010 г. Ученые отмечают, что, в соответствии с международными стандартами здравоохранения, такое количество радиоактивного элемента не представляет собой риск для здоровья человека или состояния окружающей среды и даже в 1000 раз ниже, чем допустимый предел в питьевой воде, установленный Агентством по охране окружающей среды США. Проведенные исследования не только позволяют внести коррективы в существующие модели циркуляции океана, но и имеют важное социальное значение, так как дают достоверную информацию о реальных последствиях аварии на АЭС Фукусима.

*В. В. Стрекопытов*

## Сокращение выбросов парниковых газов после введения Индонезией моратория на выдачу новых лицензий на посадки масличных пальм и лесозаготовки

Reductions in emissions from deforestation from Indonesia's moratorium on new oil palm, timber, and logging concessions. Jonah Busch, Kalifi Ferretti-Gallon, Jens Engelmann, Max Wright, Kemen G. Austin, Fred Stolle, Svetlana Turubanova, Peter V. Potapov, Belinda Margono, Matthew C. Hansen, Alessandro Baccini. PNAS. 2015. Vol. 112. No 5. P. 1328–1333.

Считается, что бурный подъем сельскохозяйственного и целлюлозно-бумажного производства в развивающихся странах станет главной причиной сокращения тропических лесов и увеличения на 10–15% к 2050 г. глобальных выбросов парниковых газов. С целью уменьшения этих выбросов Индонезия в мае 2011 г. ввела государственный мораторий на выдачу новых концессионных лицензий под плантации масличных пальм и лесозаготовки. Мораторий касался защитных территорий — нетронутых лесов и торфяников. Анализируя данные по выдаче лицензий, изменению объемов лесных площадей и доходам сельхозпроизводства за 10 лет, авторы пришли к выводу, что, если бы мораторий был введен в 2000 г., то выбросы парниковых газов в масштабах всей страны за период 2000–2010 гг. составили бы 241–615 Мт эквивалента  $\text{CO}_2$  ( $\text{CO}_{2e}$ ), что всего лишь на 2,8–7,2% ниже фактически зафиксированного уровня. Принятых мер явно недостаточно, чтобы добиться запланированного 26-процентного сокращения выбросов. Новые концессионные участки дают лишь 15% от общего объема парниковых выбросов, а 21,1% составляют эмиссии с действующих концессионных площадей и 58,7% — эмиссии с делянок, расположенных за пределами защитных территорий и не требующих лицензирования. Для сравнения анализировались два альтернативных сценария введения мер в рамках модели, предложенной Еврокомиссией по Схеме торговли выбросами (European Union Emission Trading Scheme, EU ETS), где используется понятие цены разрешения (квоты) на выбросы. Для Европы эта цена составляет около 10 \$ за тонну  $\text{CO}_{2e}$ . Один сценарий предусматривал вариант регулируемой цены разрешения на выбросы, другой сценарий — свободную цену. Выяснилось, что того же эффекта, что и от введения моратория, можно было достичь при установлении цен разрешения на выбросы на уровне 3,30–7,50 \$/т  $\text{CO}_{2e}$  (сценарий с регулируемой ценой) или на уровне 12,95–19,45 \$/т  $\text{CO}_{2e}$  (сценарий со свободной ценой). Авторы в данной работе численно оценивают эффективность локальных (в том числе — проводимых в масштабах целой страны) мер по сохранению природной среды, избегая их излишнего идеализирования, и сравнивают их эффект с потенциалом глобальных программ по предотвращению последствий климатических изменений. Делается вывод о том, что такие локальные мероприятия, как мораторий на выдачу концессий, могут рассматриваться лишь как временные и краткосрочные. В качестве же главного инструмента сокращения выбросов парниковых газов остается глобальная стратегия введения схем торговли квотами на выбросы парниковых газов.

*В. В. Стрекопытов*

## Быстрое осаждение окисленных биогенных соединений на поверхность лесов умеренной зоны

Rapid deposition of oxidized biogenic compounds to a temperate forest. Tran B. Nguyen, John D. Crouse, Alex P. Teng, Jason M. St. Clair, Fabien Paulot, Glenn M. Wolfe, Paul O. Wennberg. PNAS. 2015. Vol. 112. No 5. E392–E401.

Леса являются главным источником летучих органических соединений (прежде всего, изопрена), содержащих в своем составе до половины всего выделяемого на планете углерода. Этот углерод в результате фотолиза и окислительных реакций в атмосфере с участием гидроксильных радикалов (ОН), озона (O<sub>3</sub>) и нитрат-радикалов (NO<sub>3</sub>) переходит в многофункциональные окисленные органические летучие соединения. Одним из важнейших процессов выведения окисленных соединений из атмосферы является сухое осаждение. Однако механизм его пока слабо изучен из-за сложности прямых наблюдений за потоками неорганических веществ в атмосфере. Данная работа является новым этапом в количественной оценке скоростей сухого осаждения примесных газов в условиях типичной лесной экосистемы умеренного климата юго-востока США. Замеры скоростей сухого осаждения производились для 16 атмосферных соединений биогенного происхождения: перекиси водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), азотной кислоты (HNO<sub>3</sub>), цианида водорода (HCN), гидроксиметилгидропероксида, пероксиуксусной кислоты, органических оксинитратов и других многофункциональных соединений, образующихся при окислении изопрена (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>) и монотерпенов. Более 6 вес.% углерода, выделяемого лесной растительностью в составе изопрена, возвращаются довольно быстро обратно в процессе сухого осаждения продуктов окисления C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>. В потоке осаждающихся окисленных соединений преобладают пероксиды, которые в районах густых лесов могут даже перекрывать озон. Среди окисленных соединений азота заметную роль (15%) играют органические нитраты, а остаток приходится на HNO<sub>3</sub>. Наблюдения показали, что водорастворимые соединения (сильные кислоты и гидропероксиды) осаждаются с наименьшим поверхностным сопротивлением со стороны растительного покрова, а соединения, обладающие средней (органические нитраты и гидроксикарбонильные соединения) или низкой (HCN) растворимостью, плохо поглощаются растительной поверхностью. Относительные скорости водорастворимых соединений определяются коэффициентом их молекулярной диффузии. На уровне растительного покрова был также зафиксирован значительный эмиссионный поток муравьиной кислоты (~ 1 нмоль/м<sup>2</sup> в сек). Результаты исследования показывают ключевую роль молекулярной диффузии в обмене водорастворимыми веществами между атмосферой и биосферой. Также полученные данные позволяют параметризовать процесс сухого осаждения в глобальных моделях химического переноса вещества, более точно оценивая поверхностные концентрации и время присутствия примесных газов в атмосфере. Делается вывод о том, что в современных моделях атмосферного химического переноса, таких как широко используемая модель GEOS-Chem, недооценивается роль сухого осаждения. Так, при сравнении данных по скоростям осаждения примесных газов, полученных из GEOS-Chem, с результатами фактических наблюдений выяснилось, что модельные данные занижены на 45%.

В. В. Стрекопытов

## Химические признаки магнитотаксисных бактерий

Chemical signature of magnetotactic bacteria. Matthieu Amor, Vincent Busigny, Mickaël Durand-Dubief, Mickaël Tharaud, Georges Ona-Nguema, Alexandre Gélabert, Edouard Alphandéry, Nicolas Menguy, Marc F. Benedetti, Imène Chebbi, François Guyot. PNAS. 2015. Vol. 112. No 6. P. 1699–1703.

Магнетит (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) – широко распространенный минерал, встречающийся в таких геологических формациях как железистые кварциты, платформенные карбонатные отложения или палеопочвы. Магнетит может образовываться как абиотическим, так и биотическим путем. В частности, наночастицы магнетита синтезируются магнитотаксисными бактериями (МТВ) и диссимилирующими Фередуцирующими бактериями. МТВ продуцируют магнетит и грейгит (Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>) как в пресноводной, так и в морской средах, обитая в переходной кислородно-бескислородной зоне, обладающей микроаэрофильной средой, необходимой для роста этих бактерий. В ходе биологических процессов в МТВ кристаллы магнетита или грейгита активно отлагаются в межклеточных органеллах – магнетосомах. Магнетосомы собираются внутри клеток в цепочки, образуя постоянные магнитные диполи. Это позволяет МТВ занимать ориентированное в магнитном поле Земли положение, оптимальное с точки зрения вертикальных химических градиентов. После смерти организмов магнетосомы накапливаются в осадочных отложениях. Идентификация ископаемых МТВ (магнитофоссилий) в геологических образованиях может дать важную информацию об эволюции жизни и процессов биоминерализации в геологической истории. И здесь важно научиться отличать биогенный магнетит от абиогенного. Несмотря на то, что биогенный магнетит обладает характерной кристаллографической структурой, однозначно определить ее чаще всего трудно даже с использованием электронного микроскопа, так как структура магнитных цепочек со временем разрушается в процессе деградации органического материала, из которого сложены магнетосомы. Авторы предлагают использовать для идентификации биогенного магнетита его химический состав (прежде всего, состав примесей) в совокупности с комплексом физических и минералогических признаков. Был проведен сравнительный анализ 34 элементов-примесей в образцах искусственно синтезированного абиогенного магнетита, полученного путем осаждения в водной среде, и в магнетите из магнетосом бактерий *Magnetospirillum magneticum* штамма AMB-1. Образцы анализировались с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDXS), совмещенной с просвечивающей электронной микроскопией (ТЕМ). Обнаружено, что в биомангнетите содержания большинства элементов-примесей на 2 и более порядка ниже, чем в абиогенном магнетите. Это укладывается в общую закономерность, согласно которой биогенные минералы всегда отличаются высокой чистотой. В данном контексте интересно вспомнить тот факт, что магнетит из марсианского метеорита ALH84001 также обладал высокой степенью чистоты, то есть вполне мог быть биогенного происхождения. В работе приводится количественная картина распределения элементов-примесей между двумя разновидностями минерала. Также авторы предлагают еще один новый метод определения генезиса магнетита, основанный на анализе соотношений Са и Sr. Проведенное исследование может служить основой для выработки критериев идентификации биомангнетита в горных породах.

В. В. Стрекопытов

## Океанические фронты и их роль в рыбной продуктивности океана и биогеохимических циклах

Ocean fronts drive marine fishery production and biogeochemical cycling. C. Brock Woodson, Steven Y. Litvin. PNAS. 2015. Vol. 112. No 6. P. 1710–1715.

Долгосрочные тенденции снижения притока питательных веществ в океан и сокращение первичной биопродуктивности океанской экосистемы представляют серьезную угрозу планам развития рыбного хозяйства. К этому добавляются такие неблагоприятные факторы как чрезмерный вылов рыбы, ухудшение состояния среды обитания и загрязнения океана человеком. Обеспокоенность состоянием дел с рыбной продуктивностью океана вызвала появление целого ряда прогнозных моделей. Однако ни одна из них не учитывала роль таких важных биогеохимических барьеров как океанические фронты (ОФ). Океанические фронтальные зоны – это пространство в океане, в котором происходит взаимодействие вод с различными океанологическими характеристиками. Главные ОФ Мирового океана являются границами между структурами водных масс различных широтных зон. Это своего рода «оазисы» в океане, и к ним приурочены скопления питательных веществ и первичной биомассы. В пределах зон ОФ наблюдается резкий градиент температур и солености (плотности) водных масс и, в результате конвергенции потоков, возрастает вертикальное перемешивание и приток в эти зоны вещества из глубинных частей океана. ОФ

играют важнейшую роль в увеличении биопродуктивности океана, являясь природными каналами поступления пищи во все звенья трофической цепи, включая промышленно важные виды рыб и морских млекопитающих. Не менее важную роль играют ОФ и в биогеохимических циклах океана, обеспечивая экспорт углерода в глубоководные зоны. Для описания процессов, происходящих в океанических фронтальных зонах, применялись положения классической теории гидродинамики. Используя прием декомпозиции Рейнольдса для описания турбулентных потоков, было показано, что в зонах ОФ происходит резкое возрастание ковариации вероятности нахождения всех звеньев трофической цепи (хищников и их жертв) одновременно. Авторы описали, каким образом происходит нарастание биомассы экосистемы на границе ОФ, как меняется гидрологический режим и как происходит поступление в зону ОФ питательных веществ, пополняющих биогеохимический бюджет океана. На примере зоны Калифорнийского течения было показано, каким образом в пределах ОФ создаются долгосрочные благоприятные условия для формирования скоплений лосося и мелких пелагических рыб (анчоусов и сардин). Предлагается элегантный, легко компьютеризируемый алгоритм, позволяющий встроить фактор ОФ в климатические и экологические модели, в том числе те, которыми пользуется Межправительственная группа экспертов по изменениям климата (МГЭИК). Результаты исследования указывают на важность учета роли глобальных биофизических процессов в прогнозировании продуктивности морских экосистем и глобальных климатических изменений.

*В. В. Стрекопытов*

## Находка нового представителя *Docodonta* и особенности эволюционного развития базальных млекопитающеобразных

Evolutionary development in basal mammaliaforms as revealed by a docodontan. Zhe-Xi Luo, Qing-Jin Meng, Qiang Ji, Di Liu, Yu-Guang Zhang, April I. Neander. Science. 2015. Vol. 347. No 6223. P. 760–764.

В кладу млекопитающеобразных (Mammaliaforms) входят как современные млекопитающие, так и их далекие предки мезозойской эпохи. В работе описывается новая находка млекопитающеобразного, относящегося к представителям вымершей группы докодонтов (*Docodonta*), обитавших на территории Лавразии в мезозое. Докодонты, по мнению ученых, представляют собой одну из тупиковых базальных ветвей млекопитающих. Останки ископаемого животного, получившего название *Docofossor brachydactylus*, были найдены в верхнеюрских отложениях провинции Хэбэй (Китай). *D. brachydactylus* вел преимущественно подземный образ жизни, а по внешнему виду напоминал современных кротов. Млекопитающее имело длину около 9 см (от носа до основания хвоста) и вес 13–17 г. В строении его черепа и зубов имеются, с одной стороны, примитивные признаки, характерные для других базальных млекопитающеобразных (маммалиаформ), с другой – специфические черты, характерные для современных роющих зверей, таких как сумчатые кроты и златокроты. Наиболее убедительные свидетельства в пользу роющего образа жизни обнаружены в строении конечностей *D. brachydactylus*. В частности, его пальцы состоят только из двух фаланг (а не трех, как у большинства древних и современных млекопитающих), причем концевые фаланги увеличены, расширены и похожи на лопаты, а специальный выступ у основания не позволяет концевой фаланге отгибаться назад. Все это – отличительные признаки роющих зверей. Например, уменьшение числа фаланг характерно для современных златокротов, пальцы которых похожи на пальцы *D. brachydactylus*. Это типичный пример параллельной эволюции, то есть независимого формирования сходных адаптаций у разных групп животных, в данном случае – у базальных млекопитающих (докодонтов) и плацентарных. Авторы предполагают, что основой для такой конвергенции являются общие генетические механизмы, ответственные за регуляцию развития конечностей у эмбрионов наземных позвоночных. У златокротов в ходе эмбрионального развития в будущих пальцах формируются зачатки всех трех фаланг, но потом две из них (проксимальная и средняя) сливаются. У мышей и людей аналогичный фенотип (слияние фаланг) иногда возникает из-за нарушения работы регуляторных генов каскадов, контролирующих закладку сустава между фалангами. К числу регуляторов, участвующих в этом процессе, относятся белки BMP2 (bone morphogenetic protein 2), GDF5 (growth and differentiation factor 5) и ряд других. Другим характерным признаком скелета *D. brachydactylus* является утрата поясничных ребер. Генно-регуляторный механизм, управляющий закладкой этих ребер в эмбриогенезе, одинаков для всех млекопитающих. Ключевую роль в нем играют гены *Hox9* и *Myl5*. Изменений в работе небольшого числа генов может оказаться достаточно для радикального изменения фенотипа. Делается вывод о том, что единые для всех млекопитающих морфогенетические механизмы, обусловившие морфологическое разнообразие и диверсификацию этого огромного класса позвоночных, действовали еще у маммалиаформов, то есть задолго до появления современных млекопитающих.

В. В. Стрекопытов

## Древесный докодонт юрского периода и экологическая диверсификация млекопитающеобразных

An arboreal docodont from the Jurassic and mammaliaform ecological diversification. Qing-Jin Meng, Qiang Ji, Yu-Guang Zhang, Di Liu, David M. Grossnickle, Zhe-Xi Luo. Science. 2015. Vol. 347. No 6223. P. 764–768.

Докодонты (*Docodonta*) являются вымершей тупиковой базальной ветвью ранних млекопитающеобразных (маммалиаформов), широко распространенных на территории Лавразии в мезозое. В статье описывается находка нового докодонта из среднеюрских отложений провинции Внутренняя Монголия (Китай). Найденное млекопитающее, получившее название *Agilodocodon scansorius*, в отличие от ранее известных наземных, роющих и плавающих докодонтов, обитало на деревьях. Длина животного составляла около 14 см (от носа до кончика хвоста), а вес – 27–40 г. Судя по строению конечностей и позвоночника, *A. scansorius* был прекрасно приспособлен к лазанию по деревьям. Об этом говорит строение периферических плечевых и проксимальных локтевых костей, голеностопного сустава, а также поясничных и верхних хвостовых позвонков. Так, плечевые кости *A. scansorius* – узкие и грацильные по сравнению с широкими и крепкими костями роющих или плавающих докодонтов, таких как *Castorocauda* и *Haldanodon*. Но в целом, скелет *A. scansorius* обладает широким синапоморфизмом с другими докодонтами, отличаясь главным образом строением моляров. Строение зубов *A. scansorius* указывает на питание в основном растительной пищей (прежде всего камедью и древесным соком). По таким признакам, как форма моляров и рельеф их поверхности, *A. scansorius* сходен с некоторыми лемурами, галаго и лори – приматами, питающимися насекомыми, плодами и соками растений. Сходство с приматами прослеживается и в строении лап. У других докодонтов в строении моляров нет столь четких признаков адаптации к растительной пище, и все они, по-видимому, были плотоядными или всеядными. Резцы *A. scansorius* имеют необычную форму: они похожи на широкие, заостренные на конце лопаты или ложки, сильно выпуклые снаружи (со стороны губ) и вогнутые изнутри (со стороны языка). Авторы отмечают, что похожие резцы имеются у некоторых американских обезьян – мармозеток, паукообразных обезьян, ревунов. Эти обезьяны используют резцы для прогрызания древесной коры, чтобы добраться до сока и сладких выделений деревьев. По-видимому, *A. scansorius* тоже добывал себе пропитание таким способом, что само по себе уникально для животных юрского периода. Таким образом, находка *A. scansorius* существенно расширила представления о спектре экологических адаптаций ранних млекопитающих и показала, что способность к конвергентной эволюции схожих комплексов жизненных форм и к параллельному освоению одинаковых наборов экологических ниш характерна не только для высших млекопитающих (сумчатых и плацентарных). Этой способностью обладали уже базальные маммалиаформы, демонстрирующие примеры широкой экологической диверсификации на глубоком таксонометрическом уровне, а не только между крупными кладами, как считалось ранее. Сделанная находка подтверждает гипотезу о том, что экологическое и морфологическое разнообразие юрских млекопитающих было выше, чем предполагалось до сих пор.

В. В. Стрекопытов

## Номо erectus из Тринила (о. Ява) использовал раковины для изготовления инструментов и нанесения рисунков

Homo erectus at Trinil on Java used shells for tool production and engraving. Josephine C. A. Joordens, Francesco d'Errico, Frank P. Wesselingh, Stephen Munro, John de Vos, Jakob Wallinga, Christina Ankjærgaard, Tony Reimann, Jan R. Wijbrans, Klaudia F. Kuiper, Herman J. Mûcher, H el ene Coqueugnot, Vincent Pri e, Ineke Joosten, Bertil van Os, Anne S. Schulp, Michel Panuel, Victoria van der Haas, Wim Lustenhouwer, John J. G. Reijmer, Wil Roebroeks. Nature. 2015. Vol. 518. No 7538. P. 228–231.

Вырезанные на твердой поверхности геометрические узоры в антропологической науке считаются признаком мышления современного типа. Споры идут о том, обладали ли когнитивными способностями другие виды первобытных людей, помимо *Homo sapiens* африканского происхождения. В статье описываются образцы из коллекции Эжена Дюбуа, хранящейся в музее Naturalis в Лейдене (Нидерланды). Это — раковины пресноводных моллюсков *Pseudodon* из плейстоценового горизонта *Hauptknochenschicht* — основного горизонта находок костей *Homo erectus*, обнаруженного в 1891 г. в местечке Тринил (о. Ява, Индонезия) Эженом Дюбуа. Авторы выяснили, что яванский человек употреблял моллюсков в пищу, используя для открывания раковин хитроумный прием и специальный инструмент. В очень многих раковинах имелись дырочки в том месте, где крепится мускул, удерживающий раковину в сомкнутом состоянии. Если его повредить, проткнув раковину, то раковина сама без усилий откроется. Форма дырочек и их края показывает, что питекантропы открывали раковины с помощью акульих зубов. Край одной из раковин заострен и несет на себе следы шлифовки. Скорее всего, его применяли в качестве инстру-

мента (лезвия или скребка). Другой объект привлек внимание ученых зигзагообразными бороздками, вырезанными на поверхности раковины неким острым предметом. Каждая прямая на узоре составляла в длину около одного сантиметра, при этом никаких пробелов между линиями не было, то есть зигзагообразный рисунок наносился непрерывно и преднамеренно, предположительно — правой рукой. Большинство дырочек для открывания в раковинах также были проделаны правой рукой, что говорит об уже сформировавшейся у яванского *Homo erectus* асимметрии мозга. Эксперимент, в ходе которого ученые попытались воспроизвести подобную гравировку на свежей пресноводной раковине, показал, что первобытный художник должен был использовать крайне острый предмет (возможно, зуб акулы). Датирование раковин проводилось по заполняющим борозды зернам осадочных пород с помощью изотопного  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  и люминисцентного методов. Был получен возрастной коридор от  $540 \pm 100$  до  $430 \pm 50$  тыс. лет. Эти данные свидетельствуют о том, что горизонт *Hauptknochenschicht* значительно моложе, чем предполагалось ранее. Обнаруженная раковина с гравировкой может считаться самым древним произведением искусства в мире, свидетельствующим о том, что образное мышление и абстрактно-художественная деятельность была свойственна не только неандертальцам и *Homo sapiens*, но и их предкам — *Homo erectus*. Изученные образцы инструментов из раковин по крайней мере на 110 тыс. лет старше самых древних из известных на сегодняшний день аналогов из Греции и Италии, и на 300 тыс. лет старше древнейших рисунков. Хотя и нельзя ничего сказать о назначении и смысле рисунка на раковине, ясно то, что нанесение абстрактных гравировок было доступным для азиатских *Homo erectus* как с точки зрения их когнитивного, так и нейромоторного развития.

В. В. Стрекопытов

## Блокировка сигнальных путей хозяина, связанных с ангиогенезом ограничивает рост микробактерий

Interception of host angiogenic signalling limits mycobacterial growth. Stefan H. Oehlers, Mark R. Cronan, Ninecia R. Scott, Monica I. Thomas, Kazuhide S. Okuda, Eric M. Walton, Rebecca W. Beerman, Philip S. Crosier, David M. Tobin. Nature. 2015. Vol. 517. No 7536. P. 612–615.

Развитие туберкулеза связано с формированием гранулем. Микобактерии стимулируют васкуляризацию гранулем, способствующую их росту и распространению. Для исследования этого процесса была выбрана модельная инфекция *Danio rerio*, вызываемая патогеном *Mycobacterium marinum*, некротические гранулемы при которой сходны с гранулемами при туберкулезе. Процесс формирования и васкуляризации гранулем наблюдали путем прижизненной микроскопии в эмбрионах *D. rerio*. Для визуализации ангиогенеза и других, связанных с развитием инфекции, процессов в эмбрионах были использованы генетически модифицированные линии *D. rerio*, определенные клетки которых (эндотелий, эритроциты или макрофаги) продуцировали специфические флуоресцентные белки, а также трансгенные флуоресцентные микобактерии. При заражении туловищного отдела эмбриона, в центре плотных гранулем, содержащих микобактерии, наступает гипоксическое состояние индуцирующее выделение Vegfaa, запускающего васкуляризацию. При инфицировании эмбрионов в гемопозитические ткани хвоста гипоксии в гранулемах не наблюдалось, однако ген *vegfaa* активно экспрессировался в области гранулемы, следовательно, при данной инфекции индукция ангиогенеза не зависит от гипоксии, а стимулируется другими факторами. Важную роль в активации ангиогенеза играют белки, продуцируемые возбудителем инфекции. При заражении эмбрионов штаммом *M. marinum* с нарушением системы экспорта белков ESX1, который проникает в макрофаги, но не стимулирует формирования гранулем, активации ангиогенеза не наблюдалось. С использованием меченых эритроцитов было подтверждено, что сосуды, прорастающие в гранулему, функциональны. Белки семейства VEGFR являются тирозинкиназными рецепторами. Обработка зараженных животных ингибитором тирозинкиназных рецепторов SU5416 и пазопанибом снижала интенсивность ангиогенеза и бактериальную нагрузку. Эти вещества не блокировали роста *M. marinum* на питательных средах, что свидетельствует о том, что их влияние на рост патогена обусловлено изменениями в сигнальных путях хозяина, а не прямым воздействием на клетки возбудителя. Метронидазол – актибиотик, который активен против *M. marinum* только при недостатке кислорода. Пазопаниб, ингибируя ангиогенез, повышал выраженность гипоксии в гранулемах и эффективность метронидазола благодаря созданию гипоксических условий в гранулемах. Действие Vegfaa у модельных животных приводит к локально повышенной проницаемости сосудов в гранулемах, в присутствии ингибиторов VEGFR проницаемость сосудов снижается. Ограничение ангиогенеза, кроме того, снижало способность патогена к распространению в организме эмбриона. У взрослых рыб применение пазопаниба повышало выживаемость животных при инфицировании высокими дозами патогена. При инфицировании нелетальными дозами применение пазопаниба повышало количество стерильных гранулем и гранулем с низкой бактериальной нагрузкой. Подобные гранулемы обнаруживаются у людей при бессимптомном течении заболевания. Таким образом, воздействие на ангиогенез подавляет развитие туберкулезной инфекции и может повысить эффективность существующих схем лечения.

А. Н. Ваганова

## Белок RBM3 опосредует структурную пластичность и защитные эффекты охлаждения при нейродегенерации

RBM3 mediates structural plasticity and protective effects of cooling in neurodegeneration. Diego Peretti, Amandine Bastide, Helois Radford, Nicholas Verity, Colin Molloy, Maria Guerra Martin, Julie A. Moreno, Joern R. Steinert, Tim Smith, David Dinsdale, Anne E. Willis, Giovanna R. Mallucci. Nature. 2015. Vol. 518. No 7538. P. 236–239.

В мозге здоровых людей синапсы постоянно перестраиваются путем ликвидации старых и образования новых – этот процесс известен как структурная пластичность. Уменьшение числа синапсов является неперенным признаком нейродегенеративных заболеваний, свидетельствующим о недостаточности компенсаторных механизмов. Уже многое известно о токсических процессах, приводящих к нарушению функций синапсов при этих заболеваниях, однако механизмы регенерации до сих пор остаются недостаточно изученными. Одна из форм структурной пластичности характерна для животных, впадающих в спячку. Под действием холода в нейронах происходят морфологические изменения, и между ними уменьшается число синаптических контактов. При согревании и возвращении к нормальному образу жизни синапсы снова восстанавливаются. Было установлено, что в состоянии «искусственной» спячки (гипотермии) можно ввести лабораторных животных, которые в природе в нее не впадают. Для этого используются инъекции аденозин-5'-монофосфата (5'-AMP). Гибнация и гипотермия индуцируют в мозге синтез белков холодового шока, одним из которых является РНК-связывающий белок RBM3. Данная работа была выполнена на мышинной модели болезни Альцгеймера (5XFAD), а также на мышах, зараженных прионным заболеванием, в ходе которого в мозге накапливаются белковые агрегаты, нарушающие нормальное функционирование клеток. Было показано, что при охлаждении до 16–18° и последующем согревании синаптическая пластичность сохранялась у мышей дикого типа и в обеих экспериментальных группах на ранних стадиях заболевания. Однако с течением времени способность к обратимым перестройкам синапсов и наработка RBM3 в экспериментальных группах снижалась. Для проверки гипотезы о том, что усиленный синтез RBM3 может обеспечивать восстановление синапсов, был проведен дополнительный эксперимент. У мышей дикого типа охлаждение приводило к повышению уровня RBM3, и этот эффект сохранялся до 3 дней. Экспериментальные мыши были дважды подвергнуты охлаждению на ранних стадиях заболевания, в результате чего уровень RBM3 повышался в несколько раз, и эффект сохранялся до 6 недель. Это способствовало восстановлению синаптической передачи, сохранению памяти и предотвращению поведенческих нарушений. Однако после отключения гена *RBM3* методом РНК-интерференции охлаждение даже на ранних стадиях заболевания не оказывало защитного эффекта. Таким образом, положительные эффекты холода на течение болезней нервной системы обеспечивались повышением уровня белка RBM3 в клетках. Увеличение экспрессии гена *RBM3* в гиппокампе даже без охлаждения предотвращало потерю синапсов, нарушение памяти и поведения у мышей с прионной инфекцией и способствовало увеличению продолжительности их жизни. Полученные данные свидетельствуют в пользу того, что дальнейшее изучение механизмов действия белков холодового шока, таких как RBM3, необходимо для понимания эндогенных репаративных процессов и может иметь терапевтическое значение в борьбе с нейродегенеративными заболеваниями.

Д. Р. Галимова

## Экспериментальные модели с использованием мышей в значительной мере воспроизводят воспалительные заболевания человека

Genomic responses in mouse models greatly mimic human inflammatory diseases. Keizo Takao, Tsuyoshi Miyakawa. PNAS. 2015. Vol. 112. No 4. P. 1167–1172.

В течение долгого времени лабораторные мыши широко использовались в качестве животных моделей для изучения механизмов, лежащих в основе различных заболеваний человека, а также для целей трансляционной медицины. Однако недавно значимость мышиных моделей для биомедицинских исследований оказалась под вопросом после выхода статьи, в которой утверждалось, что геномные ответы на различные острые воспалительные процессы очень слабо воспроизводятся в соответствующих мышиных моделях (Seok J, et al. *Genomic responses in mouse models poorly mimic human inflammatory diseases*. PNAS. 2013. Vol. 110. No 9. P. 3507–3512). Эти авторы исследовали изменения экспрессии генов у различных пациентов, страдающих от травм, ожогов и эндотоксемии, и сравнивали полученные результаты с изменением геной экспрессии в соответствующих мышиных моделях. В результате проведенной работы они обнаружили слабую корреляцию изменений экспрессии генов у людей и мышей. В итоге, авторы пришли к заключению, что важнее сосредоточиться непосредственно на изучении воспалительных заболеваний у человека, чем полагаться на использование мышиных моделей. Эта работа привлекла большое внимание со стороны исследователей и СМИ, которые подвергли большому сомнению полезность использования мышиных моделей в биомедицинских исследованиях. В настоящей работе авторы подвергли проверке выводы, изложенные в статье упомянутой выше, и предложили свой взгляд на перспективу использования лабораторных линий мышей для изучения заболеваний человека. С этой целью, исходя из предположения, что мышиные модели могут имитировать только отдельные аспекты заболеваний человека, авторы настоящей работы внесли серьезные изменения в выбор генов, исключив гены, которые не отвечают на стимулы. Особое внимание авторы уделили генам, для которых показаны значительные изменения экспрессии у мышей и у человека. В отличие от результатов Seok J, et al., уровни экспрессии генов в мышиных моделях демонстрируют исключительно высокую корреляцию с изменением экспрессии соответствующих генов у человека. Более того, мета-анализ этих данных с использованием биоинформатического инструмента NextBio выявил сходство способов регуляции многих метаболических путей и биогрупп в различных условиях у мыши и человека. Результаты данной работы свидетельствуют о том, что паттерны геной экспрессии в мышиных моделях подтверждают картину экспрессии таких генов при воспалительных заболеваниях человека и подтверждают полезность использования мышей для моделирования заболеваний человека. Авторы настоящей работы изложили в деталях различия в подходах и подробно описали ошибочные моменты в работе Seok J, et al., которая ранее привлекла огромное внимание широкой аудитории читателей и ученых, специализирующихся в различных областях биологии и медицины.

И. М. Моховоев

## TFIIH-зависимое повышение экспрессии MMP-1 при трихотиодистрофии ведет к изменениям во внеклеточном матриксе кожи пациента

TFIIH-dependent MMP-1 overexpression in trichothiodystrophy leads to extracellular matrix alterations in patient skin. Lavinia Arseni, Manuela Lanzafame, Emmanuel Compe, Paola Fortugno, António Afonso-Barroso, Fiorenzo A. Peverali, Alan R. Lehmann, Giovanna Zambruno, Jean-Marc Egly, Miria Stefanini, Donata Orioli. PNAS. 2015. Vol. 112. No 5. P. 1499–1504.

Мутации субъединицы XPD транскрипционного фактора TFIIH приводят к различным по проявлениям заболеваниям, пигментной ксеродерме и трихотиодистрофии. При пигментной ксеродерме нарушается репарация ДНК, что ведет к развитию опухолей, а при трихотиодистрофии – регуляция транскрипции. Эксперименты на культурах фибробластов от больных трихотиодистрофией, проведенные в рамках данного исследования, позволили охарактеризовать происходящие изменения на молекулярном уровне. В качестве контрольной группы были взяты клетки больных пигментной ксеродермой и здоровых доноров, существенно не различавшиеся по исследуемым параметрам. Одним из наиболее выраженных отличий фибробластов больных трихотиодистрофией была повышенная экспрессия металлопротеиназы MMP-1, как на уровне мРНК, так и на уровне белка. В культуральной жидкости культур фибробластов от больных происходило избыточное накопление различных изоформ MMP-1, в том числе и активного фермента, что было подтверждено путем зимографии. Повышенная экспрессия MMP-1 является результатом нарушения по крайней мере двух регуляторных механизмов – сигнального пути ретиноевой кислоты и ингибирующей функции белков RAR. В клетках больных после стимуляции экспрессии MMP-1 не наблюдается остановки накопления этого фермента под действием ретиноевой кислоты, что характерно для клеток контрольных групп. Фибробласты пациентов также отличает пониженное содержание белка RARβ. В норме этот белок ингибирует избыточную экспрессию MMP-1, но, из-за снижения его концентрации, этот подавляющий механизм у больных не функционирует. Повышение экспрессии MMP-1 является тканеспецифическим и наблюдается только в фибробластах. В кератиноцитах пациентов такого нарушения не выявлено. Следствием повышенного уровня выработки фермента является более активное разрушение фибробластами коллагена I типа в составе внеклеточного матрикса. Снижение содержания коллагена I выявлено как в культуре фибробластов, так и в дерме пациента, страдающего трихотиодистрофией. Повышенная способность фибробластов больных к разрушению коллагена определяет их активную подвижность. В условиях эксперимента фибробласты от пациента с трихотиодистрофией быстрее покрывали поверхность раны по сравнению с нормальными клетками. Галардин, ингибитор металлопротеиназы, снижал подвижность фибробластов больных трихотиодистрофией благодаря инактивации процесса разрушения коллагена, не влияя на подвижность клеток контрольных групп. Следует отметить, что процесс заживления ран, не ограничивающийся миграцией фибробластов, у пациентов с трихотиодистрофией замедлен. Повреждение коллагена I типа при трихотиодистрофии ведет к изменениям развития скелета, сходным с таковыми у пациентов с нарушениями структуры коллагена I типа на генетическом уровне. Другим следствием избыточной активности металлопротеиназы являются осложнения беременности в случае, когда плод несет мутацию, связанную с трихотиодистрофией, вызванные повреждением коллагена плаценты. Таким образом, MMP-1 играет существенную роль в патогенезе трихотиодистрофии и может быть потенциальной мишенью терапии при этом заболевании.

А. Н. Ваганова

## Белок Higd1a является позитивным регулятором цитохром с оксидазы

Higd1a is a positive regulator of cytochrome c oxidase. Takaharu Hayashi, Yoshihiro Asano, Yasunori Shintani, Hiroshi Aoyama, Hidetaka Kioka, Osamu Tsukamoto, Masahide Hikita, Kyoko Shinzawa-Itoh, Kazuaki Takafuji, Shuichiro Higo, Hisakazu Kato, Satoru Yamazaki, Ken Matsuoka, Atsushi Nakano, Hiroshi Asanuma, Masanori Asakura, Tetsuo Minamino, Yu-ichi Goto, Takashi Ogura, Masafumi Kitakaze, Issei Komuro, Yasushi Sakata, Tomitake Tsukihara, Shinya Yoshikawa, Seiji Takashima. PNAS. 2015. Vol. 112. No 5. P. 1553–1558.

Цитохром с оксидаза (Cco) является единственным ферментом дыхательной цепи митохондрий, который использует молекулярный кислород для формирования протонного градиента и последующего образования молекулы АТФ в процессе окислительного фосфорилирования. Цитохром с оксидаза в клетках млекопитающих состоит из 13 различных субъединиц, которые содержат четыре активных металлсодержащих центра связывания ионов меди и два гема. Эти активные центры принимают электроны от цитохрома с и затем последовательно переносят их на молекулу кислорода. Ранее авторы настоящей работы уже проводили исследования связи между восстановлением молекулы кислорода и протонным насосом с использованием методов кристаллографии белка, резонансной рамановской спектроскопии и инфракрасной спектроскопии. Было показано, что изменения в окислительно-восстановительном статусе фермента вызывают изменения пространственной структуры белка в районе активных центров, что, в свою очередь, приводит к изменению активности протонного насоса, опосредованного боковыми цепями аминокислотных остатков, координирующих ионы металлов. Поэтому, авторы предположили, что связывание аллостерического регулятора неподалеку от активных центров должно влиять на эффективность переноса электронов на молекулу кислорода и на функционирование протонного насоса. В настоящей работе авторы поставили своей целью идентифицировать молекулярный регулятор цитохром с оксидазы в условиях низкого содержания кислорода. Авторы провели скрининг генов, индуцируемых гипоксией, в кардиомиоцитах. В результате авторы идентифицировали белок Higd1a (hypoxia inducible domain family, member 1A) в качестве позитивного регулятора цитохром с оксидазы. Было показано, что рекомбинантный белок Higd1a, продуцируемый *Escherichia coli*, непосредственно связывается с комплексом цитохром с оксидазы, выделенным из сердца быка, и усиливает его активность. Было показано, что белок Higd1a вызывает структурные изменения вокруг гема а, участвующего в работе протонного насоса. Также авторами было показано, что нокаунд эндогенного Higd1 приводит к уменьшению потребления кислорода и синтеза АТФ в митохондриях, что в конечном итоге вызывает повышенную гибель клеток в ответ на гипоксию. Добавление экзогенного белка Higd1а устранило гибель клеток. Таким образом, авторами было показано, что белок Higd1a на короткое время индуцируется в условиях недостатка кислорода и усиливает активность цитохром с оксидазы, непосредственно взаимодействуя с ней вблизи ее активного центра. Индукция Higd1a приводит к повышению потребления кислорода и увеличению синтеза АТФ в митохондриях, помогая тем самым клеткам выживать в условиях гипоксии. В целом, результаты исследования свидетельствуют о роли белка Higd1a как нового, ранее неизвестного регулятора активности цитохром с оксидазы и возможной его роли в качестве молекулярной мишени для разработки лекарств при лечении заболеваний, ассоциированных с пониженной активностью цитохром с оксидазы.

И. М. Мохосоев

## Белок MITF осуществляет биогенез эндолизосом и усиливает активность Wnt сигнального пути в клетках меланомы

MITF drives endolysosomal biogenesis and potentiates Wnt signaling in melanoma cells. Diego Ploper, Vincent F. Taelman, Lidia Robert, Brian S. Perez, Björn Titz, Hsiao-Wang Chen, Thomas G. Graeber, Erika von Euw, Antoni Ribas, Edward M. De Robertis. PNAS. 2015. Vol. 112. No 5. E420–E429.

Канонический Wnt сигнальный путь играет важную роль в процессах дифференциации, роста и гомеостаза различных тканей. Нарушение регуляции передачи сигналов, опосредуемых белком Wnt, может вызвать нарушения развития и возникновение онкологических заболеваний. Канонический Wnt сигнальный путь оказывает влияние на процесс транскрипции через стабилизацию β-катенина, активатора транскрипции. В отсутствие лигандов Wnt сигнального пути, β-катенин быстро разрушается комплексом деструкции, включающим Axin1, казеиновую киназу 1α и гликогенсинтазу киназу 3 (GSK3). Во время Wnt сигналинга комплекс деструкции неактивен, что приводит к накоплению вновь синтезированного β-катенина в ядре и регуляции транскрипции генов-мишеней Wnt пути. Wnt-опосредованный сигнальный путь также вызывает стабилизацию многих внутриклеточных белков путем ингибирования GSK3. Белок MITF является белком, регулирующим активность меланоцитов, и ген *MITF* признан основным онкогеном меланомы, который подвергается амплификации в 30-40% меланом и определяет возникновение пролиферативных или инвазивных фенотипов. В настоящей работе авторы обнаружили, что семейство MiT факторов транскрипции, которое включает онкоген MITF (microphthalmia associated transcription factor), участвующий в возникновении меланомы, и регулятор функционирования лизосом TFEB, отличается наивысшей степенью консервативности среди трех последовательных сайтов фосфорилирования для GSK3 в протеомах животных. Это обстоятельство стимулировало авторов данной статьи исследовать взаимосвязь между представителями семейства белков MITF, биогенезом лизосом и Wnt-опосредованным сигнальным путем. В результате проведенных исследований было выявлено корреляция уровней экспрессии гена *MITF* с экспрессией большей части лизосомальных структур в линиях клеток меланомы. Экспрессия гена *MITF* в индуцируемой тетрациклином клеточной модели меланомы C32 вызывало значительное увеличение количества везикулярных структур и повышенную экспрессию белков эндосом, таких как Rab7, LAMP1 и CD63. Эти эндосомы представляли собой неактивные лизосомы и они проявляли меньшую протеолитическую активность. В то же время, они были способны накапливать Axin1, фосфо-LRP6, фосфо-β-катенин и GSK3 в присутствии лигандов Wnt сигнального пути. Было показано, что накопление этих белков приводило к значительному усилению Wnt сигналинга через повышение числа мультивезикулярных телец. При функционировании Wnt сигнального пути происходит стабилизация белка MITF в результате фосфорилирования GSK3. Стабилизация белка MITF приводила к усилению биосинтеза мультивезикулярных телец, что, в свою очередь, вызывало усиление активности Wnt сигнального пути. Таким образом, белок MITF, мультивезикулярные тельца и Wnt сигнальный путь могут образовывать петлю обратной связи, которая функционирует во время пролиферации клеток меланомы. Полученные в настоящей работе результаты подчеркивают значимость нарушенной регуляции биогенеза эндолизосом при Wnt сигналинге и опухолевой трансформации меланоцитов.

И. М. Мохосоев

## Лечение, направленное против фактора роста эндотелия сосудов нормализует кровоснабжение туберкулезной гранулемы и улучшает доставку низкомолекулярных соединений

Anti-vascular endothelial growth factor treatment normalizes tuberculosis granuloma vasculature and improves small molecule delivery. Meenal Datta, Laura E. Via, Walid S. Kamoun, Chong Liu, Wei Chen, Giorgio Seano, Danielle M. Weiner, Daniel Schimel, Kathleen England, John D. Martin, Xing Gao, Lei Xua, Clifton E. Barry III, Rakesh K. Jain. PNAS. 2015. Vol. 112. No 6. P. 1827–1832.

Туберкулез требует продолжительной комбинированной химиотерапии, при которой сохраняется риск возникновения устойчивых вариантов возбудителя. Невосприимчивость заболевания к лечению связана с затрудненным проникновением препаратов в гранулемы, содержащие возбудитель. Под влиянием гипоксических условий, формирующихся в гранулеме, активируется экспрессия VEGF, в результате в гранулему прорастают сосуды с нарушенной морфологией, которые не обеспечивают полноценного кровотока, и молекулы лекарственных препаратов не проникают в нее. Гипоксия также ведет к иммуносупрессии, воспалению и фиброзу ткани. В данном исследовании была предпринята попытка нормализовать структуру сосудов в гранулеме с помощью препаратов, блокирующих рецептор VEGF в модели туберкулезной инфекции на кроликах. Как у пациентов, так и у модельных животных, гранулемы сформированы слоями клеток вокруг некротизированного ядра. На периферии они богаты лимфоцитами, а в районе ядра высоко содержание макрофагов. Наиболее высока экспрессия VEGF в слое, содержащем макрофаги. С помощью иммуногистохимии было показано, что в гранулемах слой перicyтов в

стенке сосудов утрачивается, а плотность сосудов снижается по направлению от периферии к некротическому ядру. VEGF более активно экспрессируется в гранулемах, чем в нормальной ткани легких, как у пациентов, так и у модельных кроликов. Для оценки функциональности сосудов был проведен анализ распределения флуоресцентного красителя Hoechst33342 в гранулемах у кроликов. Краситель в течение нескольких минут после инъекции окрашивал паренхиму легких, но проникал в гранулемы лишь в небольшом количестве, преимущественно, в поверхностные слои. Лечение зараженных кроликов терапевтическими антителами против VEGF, бевацизумабом, снижало количество сосудов и нормализовало их структуру. В течении 3–8 дней после применения бевацизумаба у зараженных кроликов происходило восстановление сосудистого русла в области гранулем, формировалась оболочка из перicyтов и восстанавливались размеры просвета сосудов. С помощью флуоресцентного красителя подтверждалось повышение их проходимости. Сосуды с нормальной стенкой становились более устойчивыми к сдавливанию. При этом применение бевацизумаба не влияло на размер и плотность гранулем, а также не снижало микробной нагрузки. Объем ткани в состоянии гипоксии под действием бевацизумаба снижался в первые три дня, однако к восьмому дню восстанавливался до прежнего уровня. Таким образом, действие бевацизумаба является временным, и для доставки терапевтических препаратов в гранулему следует использовать первые дни после инъекции. Восстановление кровоснабжения не только открывает возможность для доставки лекарств, но и стимулирует иммунный ответ и повышает чувствительность патогена к антибиотикам. Применение бевацизумаба, возможно, позволит сократить количество применяемых в комплексной терапии противомикробных агентов и продолжительность лечения за счет повышения эффективности существующих препаратов.

А. Н. Ваганова

## Конвергентная утрата PTEN приводит к устойчивости к лечению ингибитором PI(3)Kα

Convergent loss of PTEN leads to clinical resistance to a PI(3)Kα inhibitor. Dejan Juric, Pau Castel, Malachi Griffith, et. al. Nature. 2015. No. 7538. Vol. 518. P. 240–245.

Секвенирование геномов опухолей позволяет объяснить их гетерогенность и эволюцию метастаз, происходящих из разных клонов. Осложняющим фактором в лечении опухолей является селективное давление терапии. В данном исследовании изучена эволюция генома опухоли шестидесятилетней больной метастазирующим инвазивным протоковым раком молочной железы с активирующей мутацией E542K (заменой глутаминовой кислоты лизином) в гене *PIK3CA* каталитической α-субъединицы киназы PI(3)Kα. После операции был проведен курс химиотерапии. Четыре года спустя у пациентки образовались метастазы в костях. Лечение антагонистом эстрогеновых рецепторов фульвестрантом стабилизировало состояние, но через полтора года рак поразил печень и лимфатические узлы. Анализ образца первичной опухоли методом ПЦР выявил точечную мутацию в гене *PIK3CA*, после чего больная приняла участие в клинических испытаниях препарата BYL719, ингибитора PI(3)Kα. Лечение имело некоторый эффект, но через 9,5 месяцев опухоль приобрела устойчивость к BYL719, образовались метастазы в легких, и лечение было прекращено. Через два месяца после смерти больной при вскрытии для секвенирования отобрали 14 метастаз. Были использованы такие подходы, как полногеномное и полноэкзомное секвенирование, а также секвенирование с покрытием более 500 раз по методу IMPACT. Во всех метастазах при сравнении с образцом опухоли до лечения была обнаружена утрата одной из копий гена фосфатазы PTEN, регулирующей активность PI(3)Kα. В 10 метастазах, устойчивых к BYL719, были обнаружены дополнительные генетические изменения: мутация сайта сплайсинга K342, 4 делеции в экзонах и сдвиг рамки считывания (только в легочных метастазах). Иммуногистохимическое окрашивание показало отсутствие в легочных метастазах белка PTEN, тогда как в первичной опухоли и метастазах периаортального лимфатического узла он присутствовал. Филогенетический анализ метастаз позволил предположить, что под селективным давлением BYL719 в них параллельно происходила прогрессирующая утрата PTEN. Кроме того, были проанализированы данные еще 6 больных, прошедших курс лечения BYL719. В одном из случаев *PTEN* был утрачен в обоих аллелях в образце, взятом после курса лечения, что коррелировало с развитием устойчивости опухоли к BYL719. Отсутствие *PTEN* в образце было подтверждено иммуногистохимическим окрашиванием. В двух других случаях мутации *PIK3CA*, присутствовавшие в первичной опухоли, в метастазах после лечения обнаружить не удалось. В этих случаях развитие устойчивости к препарату может объясняться положительным отбором клонов с аллелями *PIK3CA* дикого типа. Для функциональной характеристики наблюдаемых мутаций были изучены последствия нокадауна *PTEN* с помощью короткой шпилечной РНК. При нокадауне *PTEN* клеточные линии развивали устойчивость к BYL719, тогда как блокирование субъединицы PI(3)Kр110β устраняло этот эффект. Результаты исследования позволяют заключить, что параллельная генетическая эволюция отдельных метастаз с различными изменениями в последовательности *PTEN* приводит к формированию единого фенотипа: отсутствию *PTEN* и развитию устойчивости к ингибированию PI(3)Kα.

А. Л. Братцева

## Противоопухолевое действие препарата против диабета 2 типа метформина, опосредованное иммунной системой

Immune-mediated antitumor effect by type 2 diabetes drug, metformin. Shingo Eikawa, Mikako Nishida, Shusaku Mizukami, Chihiro Yamazaki, Eiichi Nakayama, Heiichiro Udono. PNAS. 2015. Vol. 112. No 6. P. 1809–1814.

В настоящее время получены данные о противоопухолевых свойствах препарата метформина (диметилбигуанида), назначаемого при диабете 2 типа. Тем не менее, механизм этой активности изучен недостаточно. В данном исследовании предложен механизм действия препарата через иммунную систему. Для исследования противоопухолевого эффекта метформина мышам вводили 200 мг метилхлорантрена — индуктора рака кожи. Потребление метформина с питьевой водой в концентрации 5 мг/мл препятствовало росту опухоли. В другом эксперименте мышам подкожно пересаживали опухолевые клетки и на 7 день начинали лечение метформином. Опухоли исчезали полностью и в отсутствие метформина не восстанавливались. Повторная пересадка тех же опухолевых клеток в удвоенном количестве не привела к образованию опухоли большего размера, что позволяет предположить развитие иммунологической памяти. Наиболее эффективное действие препарата наблюдалось в случае начала лечения непосредственно после пересадки опухоли. У мышей с тяжелым комбинированным иммунодефицитом противоопухолевый эффект метформина не проявлялся, что говорит о его зависимости от иммунной системы. Воздействие метформина в 4 раза повысило численность противоопухолевых CD8<sup>+</sup>-лимфоцитов, препятствуя их апоптозу и истощению потенциала. Истощение функциональной активности цитотоксических Т-клеток в опухолевом микроокружении объясняется взаимодействием молекул их поверхности с лигандами, экспрессируемыми раковыми клетками. Примечательно, что действие метформина не подавляло апоптоз CD4<sup>+</sup>CD8<sup>+</sup>-тимотоцитов, что говорит о специфичности препарата для опухолевого микроокружения. Большинство инфильтрировавших опухоли CD8<sup>+</sup>-лимфоцитов экспрессировало маркер истощения Tim-3 и не экспрессировало другой его маркер PD-1, что позволяет отнести их к группе эффекторных лимфоцитов со свойствами памяти. Противоопухолевый эффект метформина наблюдался и при B16-меланоме, тогда как в отсутствие лечения численность специфичных противоопухолевых CD8<sup>+</sup>-Т-клеток значительно снизилась через 7-13 дней после заражения. Антигенспецифичные CD8<sup>+</sup>-Т-клетки, обработанные метформином в концентрации всего 10 мкМ в течение 6 часов, при адаптивном переносе эффективно проникали в меланому и вырабатывали основные цитокины (интерлейкин-2, фактор некроза опухоли TNFα, интерферон-γ). В присутствии соединения С — ингибитора АМФ-активируемой протеинкиназы АМПК миграция донорских клеток нарушалась, и рост опухоли не замедлялся. Методом вестерн-блоттинга было показано, что метформин способствует фосфорилированию АМПК и ее мишени — ацетил-КоА-карбоксилазы. С использованием флуоресцентного субстрата было показано, что метформин подавляет активность важнейшего участника апоптоза каспазы 3. Белок pS6 — мишень mTOR — обнаруживался в Т-клетках в отсутствие метформина, но не был выявлен после обработки. Это позволяет предположить, что метформин ингибирует mTOR, вероятно, через фосфорилирование АМПК. Таким образом, прямое действие метформина необходимо для предотвращения неизбежной потери потенциала CD8<sup>+</sup>-Т-клеток в опухолевом микроокружении, что говорит о перспективности этого препарата в лечении рака.

А. Л. Братцева

## Терапевтические механизмы высокочастотной стимуляции при болезни Паркинсона и нейрональное восстановление путем эффекта циклического усиления

Therapeutic mechanisms of high-frequency stimulation in Parkinson's disease and neural restoration via loop-based reinforcement. Sabato Santaniello, Michelle M. McCarthy, Erwin B. Montgomery Jr., John T. Gale, Nancy Kopell, and Sridevi V. Sarma. PNAS. 2015. Vol. 112. No 6. E586–E595.

Высокочастотная (выше 100 Гц) глубокая стимуляция (ГС) базальных ганглиев и таламуса применяется в клинике для лечения двигательных расстройств при болезни Паркинсона, однако терапевтические механизмы до сих пор остаются неизученными. В данной работе для исследования терапевтических механизмов используется расчетная модель петли кора–базальные ганглии–таламус–кора в условиях нормы и болезни Паркинсона (БП). Для имитации «прямого пути» этой петли была использована модель одиночного компартмента нейронов моторной коры, дорзолатерального стриатума, внутренней капсулы бледного шара (БШв) и вентролатерального таламуса. Ранее было показано, что ГС в субталамической зоне может вызывать прямые эффекты в БШв (моносинаптическая ортодромная (ОД) активация), скорлупе (моносинаптическая ОД и антидромная (АД) активация стриатонигральных проекций), коре (АД активация кортико-субталамических проекций) и таламусе (АД активация кортико-субталамических коллатералей в таламус). Для моделирования этих эффектов применялись отсроченные деполяризующие импульсы тока (фоновое возбуждение) перед каждым импульсом ГС на каждую группу нейронов. Задержка между

импульсами тока и ГС варьировалась в соответствии с механизмом деполяризации (ОД или АД) и анатомической структурой. Амплитуда тока распределялась случайно для имитации стохастического эффекта в ОД и АД направлениях. Регулярные импульсы ГС, с постоянным межстимульным интервалом, применялись на 20, 50, 80, 100, 130, 160 и 180 Гц. Также применялись нерегулярные импульсы, когда межстимульные интервалы подчинялись гамма-распределению, со средней частотой 130 Гц. Полученные результаты указывают на то, что паттерн регуляризации скорее всего имеет «системный» эффект, поскольку возникает потому, что ГС вызывает задержанные во времени стимулы, т.е. стимулы с фиксированным отставанием от импульса ГС, в различных структурах. Эти стимулы в итоге перекрываются в конечной точке (скорлупе), таким образом вызывая надпороговую деполяризацию, которую ни один из них не сможет произвести индивидуально — эффект усиления. Результирующее возбуждение клеток стриатума затем снова попадает в петлю через стриопаллидарные проекции и сочетается с местными эффектами ГС, таким образом, обеспечивая самоподдержание и дальнейшего распространения в БШв. В целом, полученные результаты свидетельствуют о том, что существует определенный диапазон частот стимуляции (около 130 Гц в рассматриваемой модели), в котором можно достигнуть максимального восстановления, и который зависит от специфики нейрональной анатомии субъекта. Данная модель предполагает, что модуляция, индуцированная высокочастотной стимуляцией, нарушает патологический паттерн разрядов нейронов в петле, что может способствовать затуханию колебаний, характерных для патологии БП, и восстанавливать нормальную нейронную активность. Терапевтический результат может быть обеспечен эффектом усиления, который зависит от частотно-селективных резонансных свойств образующих петлю структур.

*Д. Р. Галимова*

## Наномасштабное температурное картирование действующих микроэлектронных приборов

Nanoscale temperature mapping in operating microelectronic devices. Matthew Mecklenburg, William A. Hubbard, E. R. White, Rohan Dhall, Stephen B. Cronin, Shaul Aloni, and B. C. Regan. Science. 2015. Vol. 347. No 6222. P. 629–632.

Современные микроэлектронные приборы имеют наноструктурные особенности, благодаря которым нагревание различных участков поверхности происходит неравномерно, причем измерение температурных градиентов затруднено из-за наличия принципиальных физических ограничений. Так, контактные термометры искажают температуру малой системы, а радиационные термометры обладают низким пространственным разрешением из-за дифракционных ограничений, поскольку характерная длина волны излучения сравнима или превышает размеры поверхностных структур. Фундаментальное ограничение связано с самим определением температуры  $1/T = \partial S/\partial E$ , где  $S$  и  $E$  энтропия и энергия термодинамической системы, так как с уменьшением числа частиц в системе флуктуации термодинамических параметров увеличиваются и не могут считаться пренебрежимо малыми. В работе экспериментально реализован метод термометрии с наноскопическим пространственным разрешением, основанный на измерении сдвига энергии плазмонов, вызванного тепловым расширением образца (plasmon energy expansion thermometry, PEET). Установка включает маломощный источник джоулевого нагрева образца, сканирующий просвечивающий электронный микроскоп (STEM) (для возбуждения поверхности электронным пучком) и спектрометр энергетических потерь электронов (EELS). Образцом служила алюминиевая проволока с толщиной 80 нм. Энергия объемных плазмонов  $E_p$  в алюминии пропорциональна квадратному корню из плотности свободных электронов  $n$ , ( $E_p \sim n^{1/2}$ ), а плотность электронов зависит от коэффициента теплового расширения образца и изменения температуры  $\Delta T$ . Таким образом, спектроскопические измерения  $E_p$  позволяют найти вариации температуры разных участков образца. Фокусируя электронный пучок с помощью STEM, сканируя поверхность и измеряя сдвиг энергии плазмонного пика, были получены карты распределения температуры образца без внешнего нагрева и с нагревом. При изменении температуры образца в пределах 200–600 К изменения энергии плазмонного пика составляли около 0,2 эВ, причем спектральное разрешение позволяло отождествлять границы зерен, на которых энергия плазмонного пика уменьшалась на величину  $\Delta E = 13 \pm 12$  мэВ. Пересчет шкалы плотности в шкалу температур характеризуется статистической погрешностью 3 К/Гц<sup>-1/2</sup>, погрешностью определения температуры 10% и разрешением  $\sim 1$  нм. Измеряемая система в данном случае сама является термометрическим телом. В отличие от PEET, ни один из существующих методов отображения распределения температур не обладает пространственным разрешением, превышающим 10 нм. Разработанный метод применим ко многим другим технологически важным металлам и полупроводникам, таким, как вольфрам, серебро, золото, кремний, арсенид и нитрид галлия, поскольку все они имеют достаточно острые пики плазмонных резонансов.

Г. В. Дедков

## Светоиндуцированная сверхпроводимость с применением фотоактивного электрического двойного слоя

Light-induced superconductivity using a photoactive electric double layer. Masayuki Suda, Reizo Kato, Hiroshi M. Yamamoto. Science. 2015. Vol. 347. No 6223. P. 743–746.

Электрические двойные слои (ДС) ионных жидкостей применяются в сверхпроводящих полевых транзисторах в качестве наноселевых емкостей. Под действием напряжения на затворе ионы дрейфуют к стенкам канала, образуя ДС. Это позволяет создавать поверхностную плотность носителей заряда в активном проводящем слое с величиной порядка  $\sim 10^{14}$  см<sup>-2</sup>. Но, так как движение ионов при температурах менее 200 К «замораживается», модуляция плотности носителей заряда в этом случае невозможна. В отличие от этого, в данной работе авторам впервые удалось реализовать низкотемпературную сверхпроводимость в органическом диэлектрике Мотта, используя свойства фотоактивного электрического ДС, образуемого монослоем молекул спиропирана. Эти органические молекулы под действием ультрафиолетового излучения превращаются в молекулы своего изомера — мероцианина, обладающие большим дипольным моментом, в отличие от исходного состояния спиропирана. Выстраивание молекул мероцианина перпендикулярно поверхности канала приводит к возникновению ДС с поверхностной плотностью молекул  $2 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>. Возврат в исходное состояние осуществляется при освещении мероцианина излучением видимого диапазона. Авторы изготовили фотоактивную структуру путем формирования монокристаллического слоя  $\kappa$ -Br, обладающего в исходном состоянии свойствами диэлектрика Мотта, на подложке Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (или HfO<sub>2</sub>)/Nb:SrTiO<sub>3</sub>, покрытой монослоем самопорядочивающихся молекул спиропирана (SP-SAM). В исходном состоянии пленка SP-SAM имеет слабый пик поглощения на длине волны 580 нм. Фотоизомеризация приводит к резкому увеличению интенсивности этого пика уже при комнатной температуре. При освещении видимым излучением пленка возвращалась в исходное состояние с исчезновением пика поглощения, причем не наблюдалось никакого гистерезиса при многократных прямых и обратных переходах. Влияние освещения на сопротивление структуры  $\kappa$ -Br изучалось четырехзондовым методом. После измерений в темных условиях структура облучалась УФ излучением (или видимым светом), и измерения повторялись. При достаточно высоких температурах сопротивление пленки уменьшалось с увеличением длительности освещения  $\tau$  на один-два порядка величины еще вдали от сверхпроводящего состояния, достигая насыщения при  $\tau = 180^\circ\text{C}$ . При температуре 7,3 К и длительности освещения более  $180^\circ\text{C}$  происходил сверхпроводящий переход, причем сверхпроводимость подавлялась магнитным полем с величиной 7 Т. Такое поведение указывает на то, что в истеме происходит светоиндуцированный фазовый переход диэлектрической фазы Мотта в частично сверхпроводящую фазу. Попытки управления проводимостью и сверхпроводимостью с помощью фотохромных слоев предпринимались и раньше, но до сих пор светоиндуцированные фазовые переходы и сверхпроводящие переходы не наблюдались. Наряду с демонстрацией эффекта сверхпроводимости важнейшим результатом работы является возможность модуляции плотности носителей заряда двумя встроенными электрическими полями при криогенных условиях.

Г. В. Дедков

## Усиление спонтанного излучения оптической антенной

Optical antenna enhanced spontaneous emission. Michael S. Eggleston, Kevin Messer, Liming Zhang, Eli Yablonovitch, and Ming C. Wu. PNAS. 2015. Vol. 112. No 6. P. 1704–1709.

В оптическом диапазоне спонтанное излучение атомов и молекул генерируется, главным образом, при дипольных квантовых переходах. Изобретение лазеров 50 лет назад стимулировало огромный интерес к индуцированному излучению и дало начало распространённой точке зрения о том, что по своим характеристикам оно значительно превосходит спонтанное излучение. Низкая эффективность атомов и молекул как элементарных антенн, генерирующих и принимающих оптическое излучение, связана с их малым размером  $l$  по отношению к длине волны света  $\lambda$ . Из физики антенн хорошо известно, что идеальная передающая антенна должна иметь размер  $l = \lambda/2$ , а скорость генерации излучения пропорциональна  $(l/\lambda)^3$ . В работе использована тесная аналогия между физикой антенн и физикой спонтанного излучения атомов и молекул, и экспериментально продемонстрировано, что применение оптической антенны существенно увеличивает скорость генерации спонтанного излучения. Для оценки максимально возможного усиления излучения такой антенны, находящейся в волновой зоне источника, использована классическая теория электрических цепей с учетом дополнительных потерь, обусловленных сопротивлением растекания и аномальным скин-эффектом. Следует отметить, что рассмотренный эффект усиления не имеет отношения к эффекту Парселла, связанному с увеличением скорости испуска-

ния осциллятора в резонаторе, а также к возбуждению плазмонных мод. Эффективность передающей антенны зависит от отношения излучаемой и диссипируемой мощностей. В предложенной конструкции источником спонтанного излучения служил наностержень из InGaAsP, помещённый поперек прямоугольной щели между двумя секциями оптической антенны (двух золотых стержней с длиной 400 нм и шириной 50 нм). В рассматриваемой модели эффективность антенны зависит от радиационного и омического сопротивлений, от сопротивления растекания, обусловленного аномальным скин-эффектом, от индуктивности и ширины щели  $d$ . При отсутствии сопротивления растекания фактор усиления достиг бы значения 2500 при ширине щели  $d = 10$  нм, однако с уменьшением  $d$  сопротивление растекания возрастает и эффективность антенны уменьшается до 50%. В проведенных экспериментах при ширине щели 40 нм скорость спонтанного излучения возросла в 115 раз, а интенсивность излучения с частотой 200 ТГц – в 35 раз. Антенна была изготовлена паровым осаждением пленки InGaAsP и имеет большое аспектное отношение боковых сторон. Сверху поверхность пленки была покрыта слоем TiO<sub>2</sub> с толщиной 3 нм с целью изоляции от золотых секций. Для возбуждения носителей заряда в InGaAsP, которые затем спонтанно рекомбинируют с испусканием квантов электромагнитного излучения, наностержень освещался пучком излучения титан-сапфирового лазера с длиной волны 720 нм, шириной импульса 120 фс, частотой повторения 13,3 МГц и средней мощностью 20 мВт. Размер пятна составлял 20 мкм. Если в будущем усиление оптической антенны превысит 200 раз, то спонтанное излучение в InGaAsP превзойдет по эффективности излучение полупроводниковых лазеров на основе InGaAsP.

Г. В. Дедков

## Природа эффекта резкого упрочнения вольфрама при растворении кислорода

Origin of dramatic oxygen solute strengthening effect in titanium. Qian Yu, Liang Qi, Tomohito Tsuru, et al. Science. Vol. 347. No 6222. P. 635–639.

Твердые структурированные сплавы и чистые металлы часто упрочняются при растворении в них атомов других элементов. Однако долгое время считалось, что эффект упрочнения носит ограниченный характер и имеет место только для материалов с упругими полями винтовых дислокаций. Эффект упрочнения обусловлен сопротивлением движению дислокаций, которое возникает при упругом взаимодействии между деформациями решетки (из-за наличия растворенных атомов) и дислокациями. В работе показано, что интенсивный эффект упрочнения при растворении кислорода в чистом  $\alpha$ -титане обусловлен взаимодействием между внедренными атомами кислорода и ядрами винтовых дислокаций, скользящих по призматическим плоскостям. Чистый  $\alpha$ -Ti имеет гексагональную плотноупакованную структуру и характеризуется большой величиной упрочнения при растворении малых добавок кислорода. Для его исследования применялась просвечивающая электронная микроскопия (ТЕМ) с коррекцией абберации и пространственным разрешением 50 нм, измерялись локальные механические свойства, выполнялся анализ дислокаций и проводилось *ab initio* численное моделирование на основе метода функционала плотности. Экспериментальные образцы номинально чистого  $\alpha$ -Ti имели добавки кислорода с величиной 0,1, 0,2 и 0,3 вес.%. Считается, что в гексагональном  $\alpha$ -Ti первичными подвижными дислокациями являются дислокации типа  $\langle a \rangle$  на призматической плоскости (1,10), хотя перпендикулярные винтовые дислокации также являются активными. Было установлено, что большинство краевых дислокаций имеет смешанный тип, а атомная структура их ядер одинакова при концентрациях кислорода 0,1 и 0,3%. В отличие от этого, структура ядер винтовых дислокаций существенно изменяется с увеличением концентрации кислорода, так как находящиеся в междоузлиях атомы кислорода преимущественно скапливаются возле ядер дислокаций, занимая октаэдрические положения. Это подтверждается и результатами компьютерного моделирования при вычислении энергии взаимодействия междоузельных атомов кислорода с ядрами дислокаций. Для определения влияния на прочность взаимодействий атомов кислорода с ядрами краевых дислокаций выполнялось компрессионное исследование цилиндрических образцов с диаметром 150 нм, вырезанных из большого образца  $\alpha$ -Ti с помощью ионно-лучевой обработки. Измерение зависимостей деформация-перемещение выполнялось методом индентирования в сочетании с ТЕМ. Оказалось, что образцы, содержащие 0,3% кислорода, имеют предел текучести 2,5 ГПа, а образцы с содержанием 0,3% кислорода – 0,32 ГПа. Для сравнения были выполнены те же самые компрессионные исследования макроскопических образцов. В этом случае эффект увеличения прочности был менее значительным. По мнению авторов, результаты работы носят более общий характер, и аналогичный механизм упрочнения имеет место и для других типов дислокаций в зависимости от структуры ядер дислокаций и подвижности атомов примеси в твердотельной матрице.

Г. В. Дедков

## Получение сверхпрочной высокопластичной стали с низкой плотностью путем легирования хрупкого интерметаллида

Brittle intermetallic compound makes ultrastrong low-density steel with large ductility. Sang-Heon Kim, Hansoo Kim, Nack J. Kim. Nature. 2015. Vol. 518. No 7537. P. 77–79.

Хотя сталь является «рабочей лошадкой» автомобильной промышленности и машиностроения с 1920 г., средняя массовая доля железа и стали в легковых автомобилях непрерывно уменьшается. В 2011 году она составляла всего 60,1%. Причиной этого уменьшения является низкое отношение прочности к плотности (удельной прочности) стали и железа, а также стремление металлургов улучшить механические свойства стали с помощью ее легирования другими материалами. Увеличение удельной прочности до недавнего времени достигалось путем применения сплавов железа с алюминием. Однако увеличение концентрации алюминия приводит к снижению пластичности материала вследствие образования хрупких интерметаллических соединений. В работе показано, что хрупкий, но твердый интерметаллид В2 на основе сплава FeAl может эффективно использоваться для повышения прочности вторичной фазы в сплаве алюминия и железа с низкой плотностью, причем его негативное влияние на пластичность устраняется путем изменения морфологии и дисперсности. Удельное растягивающее напряжение и пластичность полученной стали при этом оказались выше, чем у наиболее легких и прочных материалов – титановых сплавов. До сих пор основополагающей концепцией при проектировании легких сплавов на основе Fe-Al-Mn-C (так называемых TRIPLEX сталей) являлось подавление формирования хрупких интерметаллических фаз при стабилизации пластичной аустенитной матрицы. Это обеспечивалось легированием стали марганцем и углеродом. Вместо этого авторы применили легирование никелем самого интерметаллида В2 в матрице железа (4,9 вес.% Ni). Несмотря на плохую пластичность при нормальной температуре, интерметаллические соединения на основе FeAl обладают рядом преимуществ, таких как низкая плотность, коррозионная стойкость, низкая окисляемость и высокая сопротивляемость износу. Чтобы использовать эти свойства интерметаллида В2, он диспергировался в аустенитной матрице как вторичная фаза. Для проведения исследований из 40 кг исходного материала, расплавленного в индукционной печи в атмосфере аргона, был изготовлен прямоугольный образец размерами 300 мм × 240 мм × 80 мм. После двухчасовой гомогенизации при температуре 1150 °С и прокатки с начальной температурой 1050 °С из слитка были получены полосы толщиной 3 мм, которые после холодной прокатки доводились до толщины 1 мм. Затем образцы отжигались при температуре 870–900 °С в течение 2–60 мин и закалялись в воде или непрерывно охлаждались до конечной температуры 25 °С со скоростью 30 °С/с. Образцами сравнения служили закаленная прессовкой сталь и сплав  $Ti_6Al_4V$ . Структура и состав образцов изучались методами рентгеновской дифракции, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии с дисперсией по энергии, после чего измерялись зависимости напряжение-деформация и пластические характеристики. Результаты работы открывают новый технологический маршрут для получения сталей с высокой удельной прочностью, что прежде считалось невозможным.

Г. В. Дедков

## Влияние билингвизма на структуру белого вещества головного мозга

The effects of bilingualism on the white matter structure of the brain. Christos Pliatsikas, Elisavet Moschopoulou, and James Douglas Saddy. PNAS. 2015. Vol. 112. No 5. P. 1334–1337.

Уже накоплено большое количество данных в пользу того, что активное использование двух и более языков в повседневной жизни может благоприятно сказываться на когнитивных функциях, лежащих в основе процессов речевой обработки. Возрастающее число исследований, основанных на методах нейровизуализации, свидетельствует о том, что такие эффекты сопровождаются и, возможно, основаны на структурных изменениях в мозге. В данной работе рассматриваются эффекты билингвизма на структуру и функциональные связи белого вещества головного мозга. Данные, полученные ранее путем диффузионной тензорной визуализации, позволили отметить у билингов более высокие показатели фракционной анизотропии (ФА) волокон мозолистого тела (МТ), направленных как постериорно — билатерально в направлении верхнего продольного пучка (ВПП), так и антериорно — в направлении правого нижнего фронтоокипитального пучка (НФОП) и крючковидного пучка (КП). Однако участники исследования начинали изучать язык в разном возрасте — с рождения и до 11 лет. Важно выяснить, обеспечивался ли такой эффект ранним началом обучения или конкурентным использованием двух языков. Иными словами, имеет ли значение критический период начала изучения второго языка, или изучение и эффективное использование второго языка оказывает заметный эффект на структуру БВ даже при позднем освоении языка. Обзор литературы показал, что причины структурных изменений БВ остаются невыясненными. В данном исследовании принимали участие две группы: БЛ — группа людей, начавших изучать английский язык в возрасте около 10 лет (поздний последовательный билингвизм), свободно владеющих и использующих его повседневно; МЛ — носители английского языка, ни один из которых не владел вторым языком (монолингвизм). В группе БЛ методом трехмерной волоконной трактографии были выявлены более высокие значения ФА, свойственные МТ билатерально, включая колено, тело и переднюю часть валика МТ. Эти показатели были свойственны билатерально таким структурам, как НФОП, КП и ВПП. В группе МЛ не удалось выявить возрастание значений ФА ни в одном вокселе. НФОП вовлечен в процессы семантической обработки информации, поэтому наблюдаемый эффект может свидетельствовать о большей интенсивности этих процессов у билингов. МТ обеспечивает межполушарные взаимодействия и исполнительные функции, а ВПП и КП связывают зону Брока с височными долями, где особое значение имеют верхняя височная и средняя височная извилина, которые связывают с фонологической, семантической и синтаксической обработкой в разных (и порой противоречащих друг другу) моделях. Сравнение полученных результатов с результатами подобных работ позволило предположить, что наблюдаемые структурные изменения БВ характерны и устойчиво проявляются у поздних билингов, «погруженных» в языковую среду, в отличие от людей, которые систематически изучают второй язык, но активно не используют его. Ежедневное использование более чем одного языка способствует интенсивной когнитивной стимуляции, сохранению целостности определенных структур мозга и их защите от возрастных дегенеративных изменений.

*Д. Р. Галимова*

## Своевременный сон улучшает консолидацию декларативной памяти у младенцев

Timely sleep facilitates declarative memory consolidation in infants. Sabine Seehagena, Carolin Konrada, Jane S. Herbertb, Silvia Schneidera. PNAS. 2015. Vol. 112. No 5. P. 1625–1629.

Большую часть времени младенцы проводят во сне, однако мало известно о влиянии сна на ранние процессы памяти. У взрослых сон влияет и на процессуальную и на декларативную память, на качество и на количество воспоминаний. Последние исследования показали, что сон у детей дошкольного и младшего школьного возраста важнее для консолидации декларативной, нежели процессуальной памяти. Влияние сна на память младенцев до сих пор изучалось только в контексте обучения языку. Перед авторами стояли следующие вопросы: какой тип памяти зависит от сна, как сон влияет на объем памяти младенца, и имеет ли сон отношение к консолидации памяти на первом году жизни. Было проведено два эксперимента, чтобы выяснить, улучшается ли декларативная память у младенцев 6 и 12 месяцев, если за периодом обучения следует сон. Оценка декларативной памяти проводилась на основе отсроченной имитации, т.е. способности младенца повторять продемонстрированные ему ранее действия с объектами спустя некоторый период времени. Отсроченная имитация — широко известный способ оценки невербальной декларативной памяти. В эксперименте 1 память оценивалась у младенцев через 4 часа, в эксперименте 2 — спустя 24 часа. При этом младенцы были распределены на 3 группы. Младенцы 1-й группы непрерывно спали как минимум 30 мин. в течение первых 4 часов после обучения. Младенцы 2-й группы спали не более 29 мин. или не спали совсем в течение первых 4 часов после обучения. В третьей контрольной группе 50% младенцев спали, и 50% не спали в течение первых 4 часов после обучения. Результаты экспериментов показали, что младенцы, спящие  $\geq 30$  мин. в течение первых 4 часов после обучения помнят новые действия спустя 4 часа и 24 часа лучше, чем те, которые не спали или спали менее 29 мин. в течение первых 4 часов после обучения. Авторы приходят к выводу о том, что сон вскоре после обучения не только защищает новую информацию от влияния последующей информации, поступающей в период бодрствования, но и играет важную роль в консолидации декларативной памяти на ранних этапах развития. Предположение о том, что сон должен следовать относительно скоро после усвоения новой информации, опирается на модель консолидации памяти. Консолидация во время сна достигается повторной реактивацией приобретенных следов памяти в гипоталамусе, который запускает параллельную реактивацию в неокортексных сетях. Этот процесс приводит к постоянному перераспределению и усилению репрезентаций в неокортексе. Возможно, объем памяти гипоталамуса еще ограничен в развивающемся мозге, поэтому в младенчестве консолидация должна происходить часто. Время сна может иметь значение для запоминания информации не только в младенчестве, но на протяжении всей жизни. Время сна трактуется как в отношении периода обучения, так и относительно времени суток. Качество сна также играет важную роль в консолидации декларативной памяти. Логичной темой следующих исследований станет изучение причин, по которым консолидация декларативной памяти легче проходит во сне.

*Н. Ю. Колесникова*

## Страх в сочетании с повышенным уровнем С-реактивного белка вызывает возрастание частоты сердечных сокращений с каждым годом у здоровых взрослых

Fear and C-reactive protein cosynergize annual pulse increases in healthy adults. Shani Shenhar-Tsarfaty, Nadav Yayon, Nir Waisskopf, Itzhak Shapira, Sharon Toker, David Zaltzer, Shlomo Berliner, Ya'acov Ritov, Hermona Soreq. PNAS. 2015. Vol. 112. No 5. E467–E471.

В настоящее время считается доказанным, что длительный страх перед возможными террористическими атаками представляет собой значительный риск для психического здоровья, но до сих пор оставалось неизвестным, насколько этот страх отражается на физическом здоровье. Для того чтобы исследовать влияние страха перед террористическими угрозами на физическое здоровье, ученые из университета Иерусалима провели масштабное исследование с участием 17300 здоровых израильтян. Исследовались факторы, влияющие на частоту сердечных сокращений (ЧСС) в покое, и динамика этого показателя в период с 2002 по 2013 годы. Помимо измерения ЧСС, у участников исследования брали стандартные анализы крови. Также участники заполняли опросники, в которых указывали различные сведения о себе, включая индекс массы тела, уровень физической активности и др. Исследователи хотели проверить, может ли страх перед террористическими атаками привести к повышению ЧСС в покое и, соответственно, к увеличению риска смерти. Известно, что повышенный уровень ЧСС является предиктором повышенного риска смерти от всех причин, в том числе от сердечнососудистых заболеваний (ССЗ). С возрастом ЧСС обычно снижается год от года, и люди, у которых с каждым годом ЧСС в покое увеличивается, подвержены более высокому риску инфарктов и инсультов. В исследовании было показано, что ЧСС в покое зависит от общих физиологических параметров, таких как уровень физической активности и активность иммунной системы. В противоположность этому рост ЧСС в покое с каждым годом был вызван психологическими причинами. Путем статистического анализа исследователи установили, что страх перед террористическими атаками — наиболее значимый фактор ежегодного увеличения ЧСС в покое. В то время как нормальный пульс составляет 60 уд./мин, увеличение ЧСС в покое до 70–80 уд./мин наблюдалось у тех, кто испытывал длительный страх перед атаками террористов. Ученые также исследовали, как мозг приводит тело в состояние готовности к опасности. Они анализировали уровень ацетилхолина в крови — нейротрансмиттера, который замедляет процесс воспаления и участвует в реакции организма на стресс. Результаты показали, что страх перед терроризмом приводит к снижению уровня ацетилхолина и, соответственно, способности противостоять инфарктам. Также было установлено, что уровень С-реактивного белка, биомаркера воспалительного процесса, был повышен у тех участников, которые испытывали длительный страх перед террористическими угрозами и имели повышенный пульс. Это свидетельствует о том, что длительный страх, вкупе с высоким уровнем С-реактивного белка, может увеличить ЧСС в покое и соответственно риск смерти. Исследователи полагают, что, поскольку данные о ЧСС и ее изменении во времени легко получить, результаты работы могут быть полезны для выявления людей, не испытывающих симптомов ССЗ, но имеющих повышенный риск смерти от ССЗ. Им могут помочь профилактические мероприятия, направленные на снижение риска смерти от ССЗ (стимуляция блуждающего нерва, применение противовоспалительных или антихолинэстеразных препаратов и физическая активность).

Т. А. Литвинова

## Звуковой образ в высших языковых зонах при воспроизведении речи

Sound representation in higher language areas during language generation. Lorenzo Magrassi, Giuseppe Aromataris, Alessandro Cabrini, Valerio Annovazzi-Lodi, Andrea Moro. PNAS. 2015. Vol. 112. No 5. P. 1868–1873.

Как происходит кодирование языковой информации в ассоциативных зонах коры мозга человека, до сих пор до конца не изучено. Однако, благодаря данному исследованию, стало известно, что мозгом во время воспроизведения словесных высказываний используется закодированный им звуковой образ, а иногда — даже и в отсутствие самой речи. Этот факт может иметь важное значение при разработке новых стратегий помощи людям с нарушениями речи, такими как афазия. В эксперименте авторы сравнивали электрическую активность коры головного мозга бодрствующих пациентов, зарегистрированную во время нейрохирургических операций на зоне Брока (лобная доля) и доминантной височной доли, со звуковой оболочкой отдельных слов и предложений, прочитанных вслух или про себя. Электрическую активность мозга регистрировали методом электрокортикографии, а звуковые записи получали с помощью стереомикрофона. Нейропсихологическое тестирование включало в себя лингвистические элементы, чтение вслух и чтение про себя. В ходе исследования было выяснено, что во время восприятия речи электрическая корковая активность слуховых зон значимо коррелирует со звуковой оболочкой высказываний, начатых до их звучания и даже при отсутствии речи, когда пациент читает про себя. По сравнению с этим корреляция не обнаруживалась, когда электрокортикограмма была записана от верхней теменной извилины (области, напрямую не вовлеченной в генерирование речи) или от зоны Брока, а участники выполняли повторяющуюся двигательную задачу доминантной рукой, которая не включала лингвистическое содержание. Результаты показывают, что нейронная активность языковых зон коры (зоны Брока и других высших зон доминантной височной доли) определяется звуковым образом при формировании речи прежде, чем любое высказывание будет произнесено или услышано. Интересно также, что у нормально слышащих людей звуковой образ локализуется в центрах речи, а не просто является средством для выражения какой-то иной таинственной символической активности мозга. Предполагая, что проговаривание с подпороговой активацией фонаторного аппарата всегда активно, когда человек думает о чем-либо, авторы обнаружили, что корреляция между электрокортикограммой и оболочкой звука лингвистической единицы (слова) не ограничивается поздней фонологической и фонетической обработкой и кодированием артикуляционных моторных команд. Распределение сверхпороговых корреляций по всем частотам корковой активности различалась в зависимости от того, была получена звуковая оболочка от слов или предложений. Найденные значительные различия в спектральных распределениях корреляции амплитуды между словами и предложениями, равными по продолжительности, подтверждают гипотезу о том, что кодирование звука, вовлеченного на начальных этапах воспроизведения речи и, по крайней мере, у людей без афазии, не ограничивает это воспроизведение. У врожденно глухих людей, возможно, присутствует способность интерпретировать голоса говорящих людей по их артикуляции.

Н. В. Карпов

## Культурные последствия позднеголоценовых климатических изменений в Восточной Куэнке (Мексика)

Cultural implications of late Holocene climate change in the Cuenca Oriental, Mexico. Tripti Bhattacharya, Roger Byrne, Harald Böhmel, Kurt Wogau, Ulrike Kienel, B. Lynn Ingram, Susan Zimmerman. PNAS. 2015. Vol. 112. No 6. P. 1693–1698.

До сих пор среди ученых нет единого взгляда на роль климатических изменений в древней истории народов Мезоамерики. Существует мнение о том, что засуха была главной причиной смены культур в регионе, включая массовый упадок многих городов, начавшийся после 900 г. н.э. Тем не менее, отсутствуют исследования, которые могли бы подтвердить или опровергнуть эту гипотезу. Авторы статьи приводят палеолимнологические свидетельства того, что изменения климата вполне могли быть причиной ухода людей из Кантоны в 900–1050 гг. н.э. Кантона — крупный укрепленный город на Мексиканской возвышенности, насчитывавший в период своего расцвета более 90 тыс. жителей и занимавший территорию 12 км<sup>2</sup>, — был одним из крупнейших городов доколумбовой Мезоамерики. Остатки его построек располагаются в бассейне Восточной Куэнки — полупустынной области к востоку от Мехико, в штате Пуэбла. В настоящее время климат этой зоны — резко сезонный с дождливым периодом, продолжающимся с мая по октябрь. Летняя активизация атмосферной конвекции связана с потоком тепла, исходящим от нагретой поверхности земли, а также с обширным Североамериканским (Мексиканским) муссоном. Авторы провели реконструкцию многовековой истории климатических изменений в регионе на основе анализа отложений маарного (кратерного) озера Альхохука, по которым можно судить об изменениях объема дождевых осадков. Зерна аутигенного кальцита из скважин глубиной до 12 м, пробуренных в озерных отложениях, изучались с помощью методов рентгеновской флуоресцентной спектроскопии и изотопно-кислородного ( $\delta^{18}\text{O}$ ) анализа. По результатам радиоуглеродного анализа установлены максимальный возраст отложений (6200 лет) и темпы осаждения (в среднем 3,5 мм/год). Для закрытых водоемов изотопное отношение  $\delta^{18}\text{O}$  в карбонатах отражает изменение темпов испарения/выпадения осадков. Закрытость системы озера Альхохука подтверждается строгой ковариацией изотопов кислорода и углерода. Высокие значения  $\delta^{18}\text{O}$  указывают на то, что на фоне общего тренда снижения количества осадков максимально засушливый интервал приходился на период 500–1150 гг. н. э. О падении летней муссонной активности в этот период говорит и геохимический состав озерных отложений, в которых отмечается снижение объемной массы глинозема ( $\text{Al}_{2\text{O}_3}$ ), отражающей темпы сноса в озеро вместе с дождевыми осадками терригенного материала, — прежде всего полевых шпатов и вторичных глинистых минералов. Однако в период 500–1150 гг. н. э. укладываются и упадок Кантоны, и предшествовавший ему период расцвета. Скорее всего, город был покинут не только из-за смены климатических условий, но и вследствие других, например политических, причин. По мнению авторов, в начале аридного периода город мог быть даже более привлекательным для проживания, так как в регионах засуха сопровождалась политической нестабильностью, и население Кантоны увеличивалось, а к 1050 г. затянувшаяся засуха и здесь спровоцировала нестабильность и привела к запустению некогда крупного города.

*В. В. Стрекопытов*

## Травмы черепа в исследовании смертности в Дании в средние века и раннее Новое время

Cranial vault trauma and selective mortality in medieval to early modern Denmark. Jesper L. Boldsen, George R. Milner, and Svenja Weise. PNAS. 2015. Vol. 112. No 6. P. 1721–1726.

Травмы черепа всегда представляли смертельную угрозу жизни людей, будь то Средние века, или наше время. Археологическая информация о скелетных травмах, как правило, лишь перечисляет следы повреждений или болезней. Авторы статьи ставят перед собой задачу количественно определить повышение риска смерти после перенесенных травм черепа. Исследование проводилось на скелетных останках, собранных на трех кладбищах Дании, относящихся к периоду 12–17 вв. Из общего количества полностью или частично сохранившихся скелетов для целей анализа были выбраны 236 скелетов мужчин в возрасте старше 15 лет. В большинстве случаев перенесенные травмы черепа определялись по состоянию лобной и теменной кости. Зарубцевавшиеся повреждения черепа определялись визуально по изменению формы костей в виде углублений или глубоких порезов. Авторы оценили средний возраст умерших и соотнесли продолжительность жизни после полученной травмы черепа со средней продолжительностью жизни, т.е. определили приобретенный риск, которому подвергался выживший в течение всей оставшейся жизни. В результате исследования выяснилось, что риск смерти людей, перенесших травмы черепа в 6 раз превышал риск смерти их современников без указанных травм и вдвое превышал аналогичный риск сегодня, что во многом объяснялось недостатками медицинского обслуживания и отсутствием социальной поддержки. В подавляющем большинстве случаев травмы черепа принадлежали скелетам мужчин, свидетельствуя о высоком уровне межличностного насилия, присущего тому времени. Данные о смертности позволяют предположить, что первичная травма черепа нередко сопровождалась травмой мозга. Несмотря на недоказуемость данного утверждения, вывод об этом можно сделать по тяжести повреждений черепа. Как и сегодня, в прошлом травмы головы могли привести к потере работоспособности или деформированному поведению, вызванному двигательной, когнитивной недостаточностью или дефектами психологического характера. Анализируя патологические особенности скелетов в сочетании с их распределением по возрастным группам, можно оценить жизненные трудности, которые испытывали индивиды после перенесенных травм и болезней. Итоговой целью работы стало выявление разнородных скрытых компонентов риска смерти и их измерение. Подход, используемый в работе, позволяет оценить вероятность смерти в результате обширных повреждений или других серьезных заболеваний на большом историческом срезе общества, что подтверждает его значимость для палеопатологических исследований. Принципиальное археологическое значение имеет возможность использовать следы перенесенных травм черепа в качестве маркера для категоризации общества согласно жизненному опыту. Данный принцип можно экстраполировать и на более общие эпидемиологические исследования, базирующиеся на данных о смерти. Чтобы проверить гипотезу о повышенном уровне смертности в связи с перенесенной травмой черепа на отдельных сегментах общества, выделенных по принципу социального положения, рода занятий, перенесенных заболеваний или рациона, потребуются исследование сотен ископаемых свидетельств, относящихся к этому периоду.

*Н. Ю. Колесникова*

Еженедельный журнал Российской ассоциации содействия науке

# НАУКА В мире

**Следующий номер журнала выйдет  
3 марта 2015 года**