

НАУКА **В мире**

Обзор журналов
Nature, PNAS, Science

Номер 34 (2)
23 июня 2015 года

Открыта уникальная культура бактерий,
ускоряющая очистку загрязненных
территорий

стр. 8

Ученые из Стэнфорда (США):
добыча сланцевого газа вызывает землетрясения

стр. 10

Малые спутники
Плутона двигаются
хаотично

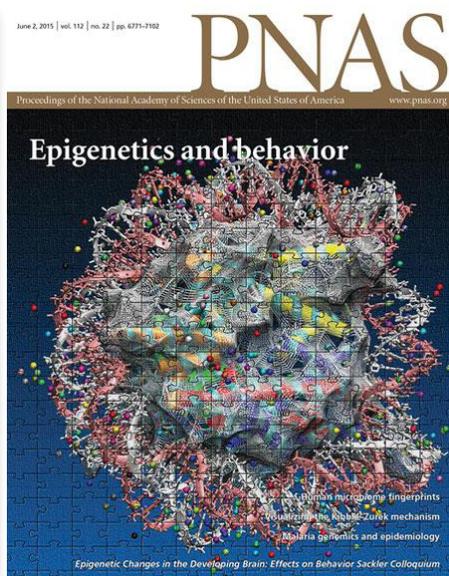
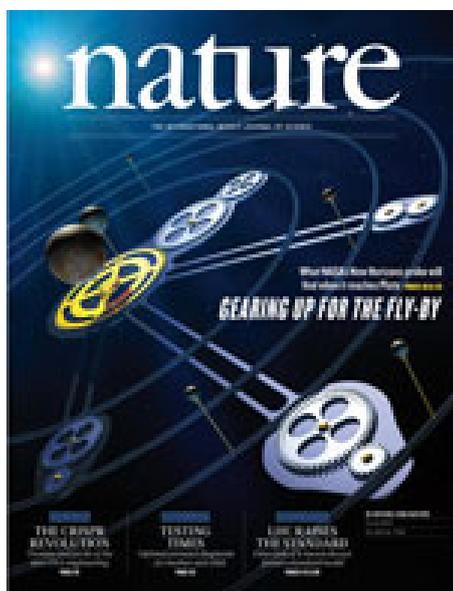
стр. 15

Каждый человек обладает
персональным набором
микрорганизмов

стр. 28

Выявлены геномные
признаки перехода
к эусоциальности

стр. 25



ЖУРНАЛ «НАУКА В МИРЕ» № 34 (2)

23 июня 2015 года

Издается еженедельно

УЧРЕДИТЕЛЬ

Общероссийская общественная организация
«Российская ассоциация содействия науке»

Свидетельство о регистрации СМИ:

Эл № ФС77-59570 от 10 октября 2014 года



РАСЧН

Российская ассоциация
содействия науке

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ПРЕЗИДИУМА РАСЧН

Евгений Павлович ВЕЛИХОВ,

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

ПЛЕНУМ РАСЧН

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 РАСЧН, почетный
председатель Правления
Санкт-Петербургского союза ученых

Надежда Дмитриевна ВАВИЛИНА,

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

Валерий Александрович ЧЕРЕШНЕВ,

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

Татьяна Владимировна ЧЕРНИГОВСКАЯ

член Президиума РАСЧН, 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 РАСЧН

Административный директор

Светлана Александровна ХОЗИНСКАЯ

РЕДАКЦИЯ

Старший научный редактор

Владислав Владимирович СТРЕКОПЫТОВ

Редактор

Ирина Александровна БАННОВА

Редакторы-референты

Дедков Г. В., Завалишина С. А., Зворыкина С. В.,
Карпов Н. В., Лещанский И. Ю., Мохосоев И. М.,
Низин Д. Р., Сварник О. Е., Стрекопытов В. В.,
Тиунова А. А.

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.

Россия живет скоростями

Наши мечты неудержимы — мы стремимся вперед со скоростью мысли. Мы способны быть в любом месте, двигаться в любом направлении, преодолевать огромные расстояния. Это энергия, которая движет жизнью, это то, чем живет каждый из нас.

ОАО «РЖД» Россия живет дорогами

Читайте в этом номере:

Информационное поле

5 От редакции

Самое интересное в рефератах

Топ-10 статей текущего номера

8 Новости • В России

Ученые КФУ открыли уникальную культуру бактерий, ускоряющую очистку загрязненных территорий

В России создают «плотный» лазер для строительства судов и самолетов

9

Археологи дешифровали старонемецкие надписи на надгробьях в центре Москвы

НПО «Микроген» возобновляет производство колесодержащих препаратов для восстановления нормального биоценоза кишечника

10 Новости • За рубежом

Земля усеяна обнаруженными специалистами кратерами

Добыча сланцевого газа вызывает землетрясения

11 In Advance

О происхождении и родстве Кенневикского человека

12

У зубатых китов удивительным образом утеряны ключевые антивирусные белки Mx1 и Mx2

Экстремальная экосистемная нестабильность подавляла доминантное развитие тропических динозавров на протяжении 30 млн лет

13

Повышенное оптическое отражение и рассеяние тепла предохраняют серебряных муравьев от перегрева

Nature • PNAS • Science: рефераты статей

15 Астрономия

24 Биология

16 Физика

33 Медицина

18 Химия

37 Нейронауки и психология

19 Науки о Земле и экология

43 Социальные науки

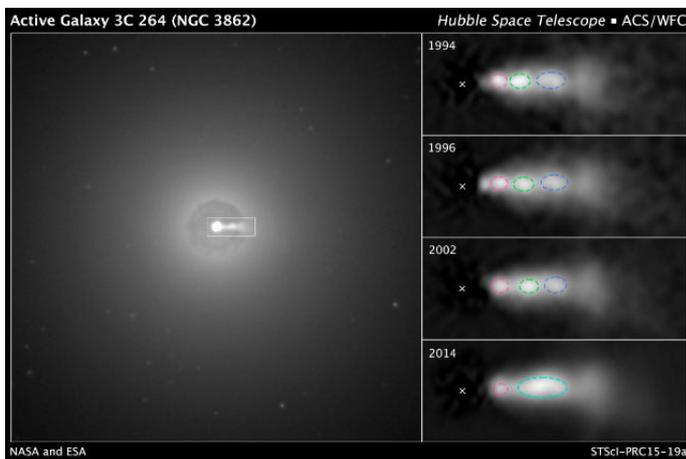
23 Антропология и история

45 Технологии и материалы

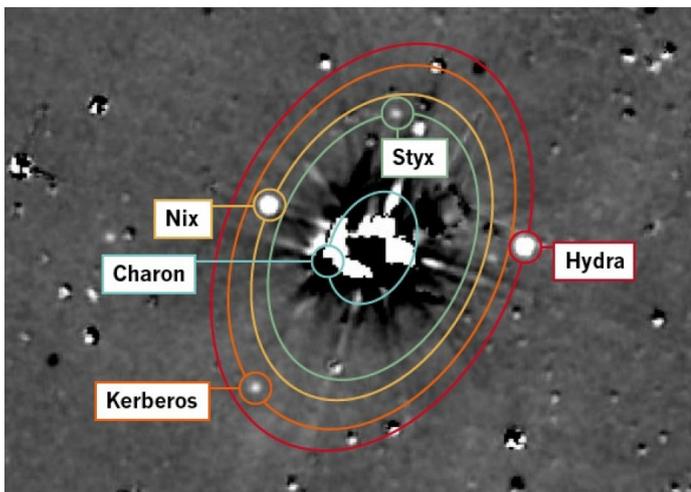
Самое интересное в рефератах

Топ-10 статей текущего номера

1. Астрономы зафиксировали столкновение сгустков плазмы внутри облака выбросов черной дыры. Ученым, работающим с телескопом Hubble, удалось запечатлеть столкновение двух сгустков плазмы, выброшенных сверхмассивной черной дырой почти со скоростью света. Природа таких космических «выстрелов», которые помимо черных дыр совершают недавно образовавшиеся звезды, до сих пор остается неясной. По одной из версий, материя, падающая на центральный объект, перегревается и выстреливает вдоль оси вращения, а мощные магнитные поля не дают ей разлетаться в разные стороны. При этом, если поток падающего вещества не является однородным, вместо сплошной струи в пространство вырывается очередь из отдельных сгустков. Именно такое событие было замечено вблизи гигантской черной дыры NGC 3862, расположенной в центре галактики в 260 млн световых лет от Земли. *Реферат на с. 15.*



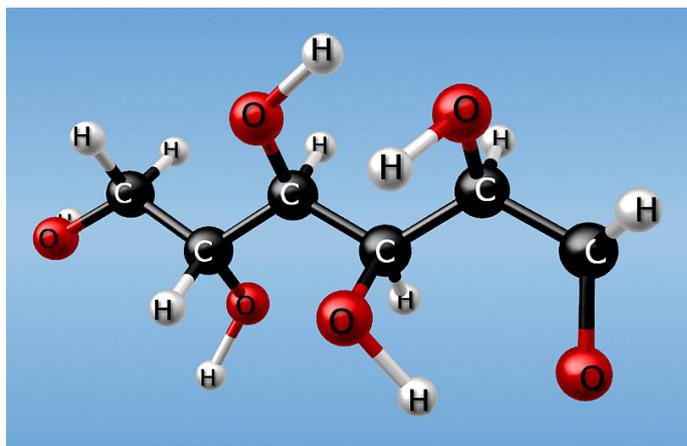
Покадровое изображение столкновения и выбросов плазмы вблизи черной дыры NGC 3862 / NASA/ESA/E.Meyer



Система Плутона и его спутников / NASA/Johns Hopkins Univ. App. Physics Lab./Southwest Research Inst.

2. Малые спутники Плутона движутся хаотично. Ученые NASA с помощью орбитального телескопа Hubble установили, что малые спутники Плутона движутся хаотично. Согласно выводам исследователей, два спутника — Никта и Гидра — во время движения по орбитам совершают вращения в разных направлениях, постоянно покачиваясь и переворачиваясь. Такой хаос в движениях спутников специалисты связывают с изменениями в их гравитационном поле, которое создается при вращении двойной планеты, образуемой Плутоном и его главным спутником — Хароном. Ученые полагают, что два других малых спутника — Кербер и Стикс — также движутся беспорядочно. Однако, несмотря на хаотичность движения, спутники замкнуты в пределах устойчивых траекторий, и движутся по резонансным орбитам, которые выстраиваются в регулярные временные промежутки в соответствии с орбитальным резонансом Лапласа. *С. 15.*

3. Жизнь на Земле могла появиться благодаря метеоритам. Российско-итальянская группа астрономов пришла к выводу о том, что именно трехатомные молекулы цианистоводородной кислоты и воды, а также производный от них формамид, стали источником жизни на Земле. В лабораторных условиях они подвергли молекулы формамида облучению протонами высоких энергий. Во время эксперимента по облучению метеоритов ученые стали свидетелями спонтанного синтеза, в результате которого удалось получить сложные пребиотические соединения, участвующие в построении ДНК и РНК. По итогам исследования, ученые сделали заключение, что именно молекулы формамида, попавшие на Землю в результате столкновения планеты с астероидами и подвергшиеся природному облучению, стали первичным материалом для зарождения жизни. *С. 18.*



Формамид (метанамид) (HCONH₂) / mozalearn.com

4. **Раскрыт секрет сверхбыстрого исчезновения ледниковых озер Гренландии.** Еще в 2006 г. геофизики, изучавшие ледники Гренландии, обнаружили, что в летнее время на их поверхности образуются водоемы — супрагляциальные озера. Но удивило ученых другое: одно из таких озер (Норт-Лейк) площадью 5,6 квадратных километров исчезло за считанные часы. По оценкам ученых, скорость «осушения» оказалась выше, чем движение воды в Ниагарском водопаде. Каким образом это происходит и куда исчезают озера, выяснилось только сейчас. Оказалось, что вода уходит по вертикальным разломам, возникающим в результате подвижек ледникового покрова, а эти движения, в свою очередь, вызваны просачиванием талой воды. Для проведения исследования использовались 16 станций GPS, которые следили за состоянием поверхности ледника. С. 19.



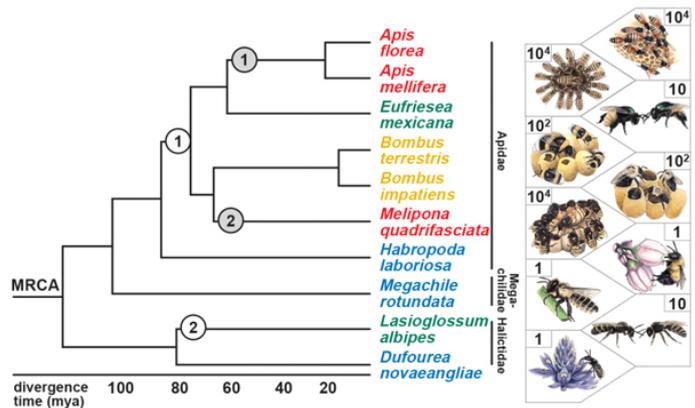
Супрагляциальные озера Гренландии / pinterest.com



Фрагмент челюсти *Australopithecus deyiremeda* / Yohannes Haile-Selassie

5. **В Эфиопии нашли нового предка человека.** Гоминид обитал на африканском континенте одновременно со знаменитой Люси — *Australopithecus afarensis*, но являлся вполне самостоятельным видом. Фрагменты черепа *Australopithecus deyiremeda*, как назвали новый вид доктор Йоханнес Хайле-Селассие из Кливлендского музея естественной истории и его коллеги, были обнаружены в регионе Афар, знаменитом своими окаменелостями древних гоминид. Возраст находки составил 3,3-3,5 млн лет, а видовое название *deyiremeda*, в переводе с языка афарских племен, означает «близкий родственник». Ветвь эволюции *Homo Sapiens* происходит из более раннего вида, включающего и вновь описанного австралопитека. А эта находка вновь поднимает вопрос о том, от какого именно из предшествующих видов произошел современный человек. С. 23.

6. **Выявлены геномные признаки эволюционных переходов от одиночного к групповому проживанию.** Сравнительный анализ геномов 10 видов одиночных и общественных пчел показал, что поэтапное развитие эусоциальности, происходившее параллельно в нескольких эволюционных линиях, было основано на изменении разных наборов генов. Главной общей чертой всех рассмотренных случаев является усложнение регуляторных генных сетей, о чем можно судить по увеличению числа участков ДНК, служащих для прикрепления регуляторных белков (транскрипционных факторов), а также числа генов, подвергающихся метилированию. Общая направленность генетических изменений при переходе к эусоциальности говорит о росте «интерактивности» генома, то есть его способности генерировать разные фенотипы в зависимости от получаемых сигналов, в том числе социальных. С. 25.



Эволюционное дерево, показывающее родственные связи 10 видов пчел / Karen M. Kapheim et al.

7. Ученые разгадали тайну «странных животных» Дарвина. Новый метод исследования — анализ коллагенов — помог специалистам Американского музея естественной истории, Музея естественной истории в Лондоне и Йоркского университета раскрыть тайну странных животных, которых никак не мог увязать со своей теорией эволюции Дарвин. Диковинные звери — макраухении, похожие на безгорбых верблюдов со слоновьей мордой, и токсодоны с телом носорога, головой бегемота и зубами грызуна, обнаруженные Дарвином, оказались предками современных млекопитающих: лошадей, носорогов и тапиров. С. 29.



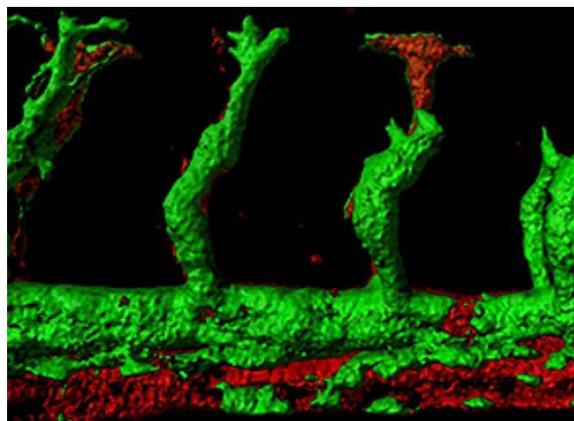
Реконструкция облика макраухении (*Macrauchenia*) / Schleich



Иллюстрация: scitechdaily.com

8. Каждый человек обладает персональным набором микроорганизмов. По данным ученых, совокупность микроорганизмов, представляющих собой микрофлору, индивидуальна для каждого человека. Это позволяет рассматривать бактерии в качестве своеобразного «биологического паспорта». Авторы исследовали биологические образцы 242 добровольцев. Для каждого человека ученые получили персональный «геномный код» — последовательности генома бактерий, которые чаще всего встречались в организме каждого из участников эксперимента. Согласно результатам, эти коды не только являются уникальными для каждого человека, но и остаются стабильными в течение длительного времени. С. 28.

9. Впервые в лаборатории получены клетки лимфатической системы. Израильские ученые из института Вейцмана впервые смогли получить клетки лимфатической системы в лабораторных условиях. Кроме того, авторы исследования уточнили, как эта система формируется в ходе эмбриогенеза. Ранее считалось, что лимфатическая система образуется при дифференциации уже существующих вен. Сторонники другой гипотезы полагали, что исходным материалом для этой системы служат ангиобласты — специализированные стволовые клетки, из которых формируются кровеносные сосуды эмбриона. Согласно результатам нового исследования оба предположения являются правильными. С. 28.



Ген *Wnt5b* вызывает дифференциацию стволовых клеток в лимфатические / J. Nicenboim et al.

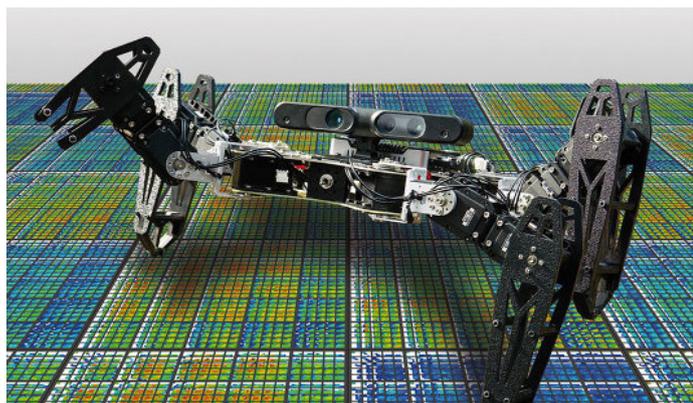


Иллюстрация: Antoine Cully

10. Инженеры научили роботов восстанавливаться после полученных повреждений. Живые организмы умеют приспосабливаться к повреждениям: например, собака, у которой поранена лапа, все равно способна ходить, бегать и даже играть. Роботы на такое не способны: поломка одной из конечностей приводит к прекращению функционирования всей машины. Инженеры из Университета Пьера и Марии Кюри в Париже создали робота, который меняет стратегию поведения при поломках и способен самостоятельно себя починить. Перед запуском такой робот проводит полную диагностику всех своих составных частей и вырабатывает несколько возможных стратегий. При аварии запускается наиболее подходящая стратегия поведения или создается новая. С. 45.

Новости • В России

Ученые КФУ открыли уникальную культуру бактерий, ускоряющую очистку загрязненных территорий

Открытие было сделано сотрудниками Казанского федерального университета (КФУ) после анализа накопленных твердых отходов завода «Казаньоргсинтез»

Обнаруженная в отходах культура бактерий (штамм *Pseudomonas stutzeri* KOS6) способна повысить эффективность очистки и восстановления загрязненной нефтью и продуктами ее переработки территории благодаря своей устойчивости к токсичным соединениям и тяжелым металлам. Кроме того, штамм восстанавливает молекулу атмосферного азота до формы, необходимой для жизни растений и других организмов.

«В этом заключается конкурентное преимущество штамма по сравнению с другими запатентованными культурами, — рассказала научный сотрудник междисциплинарного центра протеомных исследований Института фундаментальной медицины и биологии КФУ Татьяна Григорьева. — Ранее выделяли штаммы из морской воды после загрязнения нефтью, а также из загрязненных нефтью почв. Найденная нами культура получена из концентрата хими-



ческих отходов, более того, она способна выживать в этих условиях, и этим уникальна».

Надо сказать, что это не единственное преимущество данной культуры. Она уже сочетает в себе необходимый для очистки территории комплекс свойств, в том числе способность стимулировать рост растений в неблагоприятных для них условиях. Природа самостоятельно создала устойчивую, самовоспроизводящуюся и адаптированную к среде конструкцию, представляющую для человека биотехнологический интерес. В настоящее время проект находится на стадии апробации и более глубокого фундаментального исследования.

По материалам КФУ

В России создают «плотный» лазер для строительства судов и самолетов

Специалисты НВП «Топаз» в Томске разрабатывают лазерную установку для резки и сварки толстых металлов, которая не имеет аналогов в мире

«Наша идея позволяет при меньшей мощности получить более высокую плотность мощности излучения, чем у стандартных систем. Для резки и сварки толстых металлов требуется мощность от 10 кВт, а мы можем при 1 кВт получить результат по плотности мощности лучше, чем у обычного источника», — отметил директор предприятия Михаил Левицкий.

С момента появления в 60-х годах XX века первых лазеров прогресс шел по пути увеличения их мощности. Однако оказалось, что с ростом мощности лазер хуже фокусируется. Мощность современных волоконных лазеров достигает 100 кВт, но проблема с фокусировкой не позволяет эффективно использовать эти машины.

«Когда растет мощность, увеличиваются энергозатраты, но при этом плотность мощности сфокусированного излучения растет значительно медленнее. Мы хотим увеличить не просто мощность, а плотность мощности «в пятне», — пояснил Михаил Левицкий.

Синтезированный источник с улучшенной фокусировкой фирмы «Топаз» — это волоконный лазер, который сам управляет излучением и настраивается полностью автоматически. Вес компактной установки составит не более 30 килограммов, что позволит монтировать ее на промышленных роботах. Система позволяет работать на достаточно больших расстояниях. Если у обычной лазерной головки для резки металлов расстояние от оптической линзы до мишени максимум 30 сантиметров, то новой установке можно задать дистанцию до десяти метров и обрабатывать металлы в труднодоступных местах. При этом плотность мощности остается практически такой же. Проект реализуется в партнерстве с учеными из Института оптики атмосферы СО РАН. НВП «Топаз» совместно с «СИГМА-Томск» РОСНАНО создали предприятие для реализации этого проекта. Проект создания лазерной установки признан одним из лучших на российском Startup-типе, участие в его финансировании примет Фонд «Сколково».

Источник: ИНО Томск

Археологи дешифровали старонемецкие надписи на надгробьях в центре Москвы

Археологи из Института археологии РАН (ИА РАН) выяснили на примере старонемецких надгробий XVII века, что Москва имела культурные и торговые связи с Западом еще до реформ Петра I

В конце апреля нынешнего года московские археологи изучили найденные при реконструкции центра Москвы старинные надгробия. Исследователи пришли к выводу, что они принадлежали семье известных немецких дипломатов, помогавших царям вести внешнюю политику и устанавливать связи с Западом.

Ученые ИА РАН смогли прочесть надписи на плитах — как оказалось, они были сделаны на нижнерейнском диалекте старонемецкого языка. Первое надгробие было посвящено Берендту Келлерману, сыну известного по хроникам дипломата Генриха Келлермана, который помогал русским царям вести переговоры с послами и сам участвовал в нескольких посольствах в Англию и в другие страны Европы. Второе надгробие было вытесано в память Томаса Келлермана, современника царя Алексея Михайловича. Оно привлекло внимание археологов тем, что на нем были начертаны слова из относительно «свежих» для того времени протестантских богословских трактатов и мистических текстов.

Заведующий отделом археологии Московской Руси ИА РАН Леонид Беляев полагает, что иноземцы, жившие в Москве,



Найденные артефакты привлекли внимание любителей-историков, которые спасли их от уничтожения и обратили на них внимание ученых. / ИА РАН

не просто не пребывали в изоляции, а находились в тесном контакте с соотечественниками в Западной Европе. Интенсивный культурный обмен в начале и середине XVII века, по мнению археолога, мог послужить одной из предпосылок для реформ Петра I.

«Эти находки — одно из редких свидетельств активного участия в жизни Московии выходцев из Западной Европы, людей, которые строили башни Кремля, соборы, монастыри и крепости, учили лить пушки и штурмовать вражеские города, ходили с московскими князьями в походы «инструкторами», были ювелирами и механиками, врачами и аптекарями, переводчиками и послами», — отметил Беляев.

По материалам РИА Новости

НПО «Микроген» возобновляет производство колисодержащих препаратов для восстановления нормального биоценоза кишечника

Нижегородским филиалом НПО «Микроген» внедрена в производство современная технология получения маточной и производственной культур кишечной палочки, что позволило возобновить производство препарата «Колибактерин»

Сегодня предприятие «ИмБио», входящее в состав «Микрогена», является единственным в стране производителем таких препаратов и планирует выпускать более 3,5 миллионов доз «Колибактерина» в год. В рамках проекта, совместно с Нижегородским НИИ эпидемиологии и микробиологии им. академика И.Н. Блохиной, специалистами филиала НПО «Микроген» выполнены работы по установлению молекулярно-генетических свойств штаммов бактерий, используемых при производстве пробиотиков. Проведенный анализ показал безвредность исследованных штаммов, а также отсутствие встроенных плазмид и трансмиссивных генов устойчивости к антибиотикам. Установленные полные нуклеотидные последовательности геномов депонированы в международную базу данных GenBank.

Препараты для восстановления нормального биоценоза кишечника, такие как лактобактерин, бифидумбактерин,



Нижегородское предприятие проводит прикладные научные исследования в области создания и модернизации лекарственных средств, а также технологий их производства / Пресс-служба НПО «Микроген»

бификол и колибактерин, являются одной из важных групп в номенклатуре филиала НПО «Микроген» — Нижегородского предприятия по производству бактериальных препаратов «ИмБио». Применение данных пробиотиков в медицинской практике предъявляет повышенные требования к безопасности. В настоящее время одним из важнейших критериев оценки штаммов-продуцентов иммунобиологических лекарственных препаратов является их молекулярно-генетическая характеристика. Анализ генома позволяет установить наличие или отсутствие факторов бактериальной патогенности и антибиотикорезистентности, определяющих безопасность пробиотиков для человека.

По материалам пресс-службы НПО «Микроген»

Новости • За рубежом

Земля усеяна необнаруженными специалистами кратерами

Более 90 кратеров на поверхности Земли, образовавшихся в результате падения космических тел, ждут своего открытия. Об этом сообщает портал Science News.

«Шрамы» от воздействия метеоритов и прочего космического мусора, усиленные естественной эрозией почвы, есть на любой планете, отмечает автор статьи. К примеру, на Марсе их сотни тысяч. По подсчетам экспертов, около 350 не найденных кратеров есть и на поверхности Земли. Исследователи оговорились, что некоторые из них будет сложно обнаружить из-за накопившихся в них осадков.

Так, по мнению экспертов, на нашей планете находится 150 неоткрытых и неисследованных кратеров диаметром от 0,25 до 0,5 км, 106 кратеров диаметром от 0,5 до одного километра, 60 с диаметром от километра до двух, 29 с диаметром от трех до четырех километров и пять кратеров с диаметром



Кратер Пингуалуит (Pingualuit Crater) в Северной Канаде шириной 3,44 километра. / sciencenews.org

до шести километров. Что касается кратеров с диаметром более шести километров – их насчитывается 70, – то, как считается, все они были обнаружены ранее.

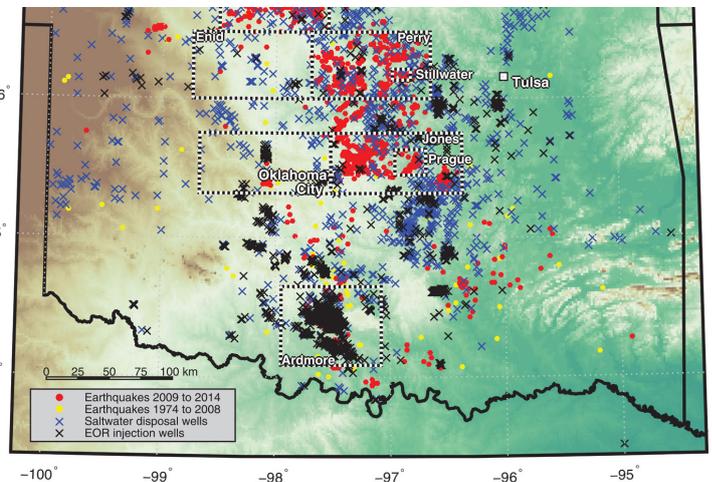
Источник: Science News, S. Hergarten and T. Kenkmann. The number of impact craters on Earth: Any room for further discoveries? Earth and Planetary Science Letters. Vol. 425, September 1, 2015, p. 187. doi: 10.1016/j.epsl.2015.06.009

Добыча сланцевого газа вызывает землетрясения

По мнению ученых из Стэнфорда (США), причиной участвовавших землетрясений в американском штате Оклахома стало использование соленого раствора, применяемого в ходе разрыва пластов при сланцевом методе добычи нефти и газа.

До 2008 года в штате Оклахома в десятилетие фиксировались одно-два землетрясения с магнитудой 4 балла по шкале Рихтера. Но только 2014 году было зафиксировано сразу 24 подземных толчка подобной мощности. На этот факт обратили внимание профессор Марк Зобак (Mark D. Zoback) и его аспирант Ролл Уолш (F. Rall Walsh) из Стэнфорда (Школа наук о Земле, энергии и окружающей среде). Проведенное учеными исследование показало, что рост числа землетрясений в Оклахоме совпал с резким увеличением закачки различных жидкостей и гелей в скважины при добыче нефти и газа посредством метода гидравлического разрыва пласта. Разработанная авторами исследования физическая модель позволила объяснить, почему эпицентры землетрясений были существенно отдалены от мест, куда заливались растворы, и в связи с чем начало сейсмической активности не совпадало с пиком их закачки. При этом ученые обратили внимание на опасность роста магнитуды искусственных землетрясений.

Выводы специалистов из Стэнфорда подтверждаются и другими данными, опубликованными в журнале Science. В частности, журнал подчеркивает, что впервые можно говорить о системной связи между землетрясениями и сланцевой добычей. Ранее подобный анализ проводился для еди-



Эпицентры землетрясений и расположение нагнетательных скважин в Оклахоме. Карта показывает местоположения недавних землетрясений (2009–2014 — красные точки), прошлые землетрясения (1974–2008 — желтые точки), скважины EOR (черные крестики) и нагнетательные скважины SWD (синие крестики).

ничных случаев, теперь же удалось увидеть картину в целом. Ученые исследовали более 187 тысяч скважин в центральной и восточной части США и сопоставили данные с 7175 зафиксированными землетрясениями. Эта статистика была изучена за период с 1973 по 2014 год. И если до 2000 года ученые смогли проследить связь между землетрясениями и добычей лишь в 20% случаев, то к 2014 году эта доля возросла до 87%.

Источник: F. Rall Walsh III and Mark D. Zoback. Oklahoma's recent earthquakes and saltwater disposal. Science Advances. 18 Jun 2015:Vol. 1, №. 5, e1500195. DOI: 10.1126/sciadv.1500195, M. Weingarten, S. Ge, J. W. Godt, B. A. Bekins, J. L. Rubinstein. High-rate injection is associated with the increase in U.S. mid-continent seismicity. Science 19 June 2015. Vol. 348. № 6241 pp. 1336-1340. DOI: 10.1126/science.aab1345

In Advance

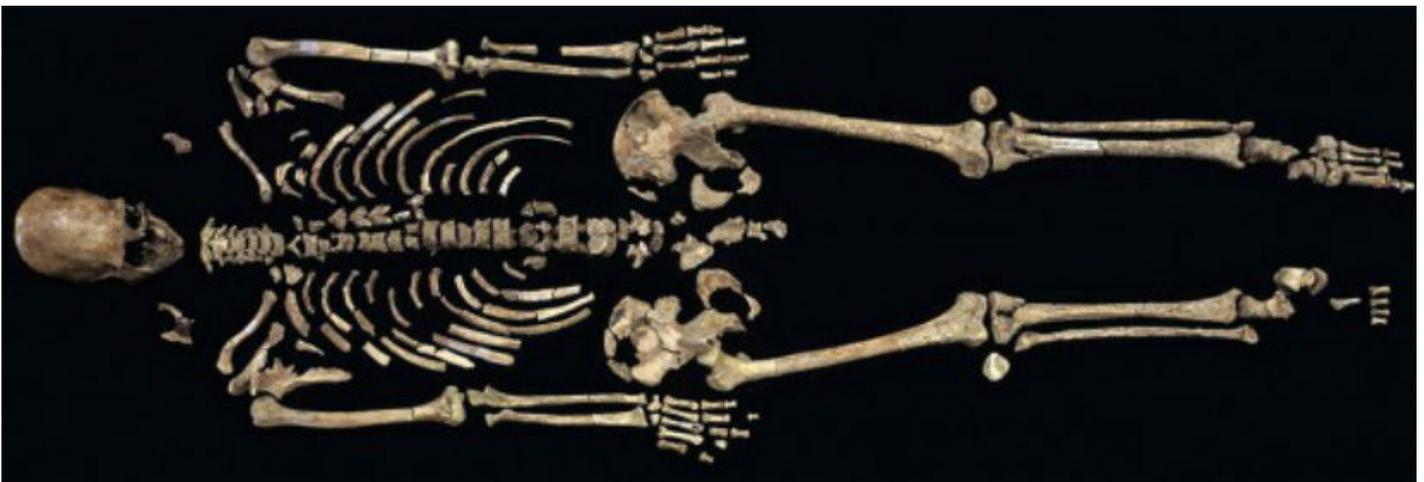
Nature Advance • Антропология

О происхождении и родстве Кенневикского человека

The ancestry and affiliations of Kennewick Man. Morten Rasmussen, Martin Sikora, Anders Albrechtsen, et al. Nature (2015) doi: 10.1038/nature14625. Published online 18 June 2015.

Скелет Кенневикского человека был случайно обнаружен в штате Вашингтон в 1996 г. Его радиоуглеродная датировка показала возраст около 8 500 лет. Ранее ряд индейских племен заявляли свои права на его останки. Согласно законам США, если их родство с ними будет доказано, скелет будет изъят из научного оборота и захоронен по индейским обычаям. В 2004 г. результаты краниометрических исследований позволили ряду ученых объявить об отсутствии родства Кенневикского человека с нынешним коренным населением обеих Америк и о том, что он ближе к айнам или полинезийцам. Последовавшее за этим судебное решение блокировало передачу скелета племенам, заявившим о своих правах на останки. В то же время, некоторые ученые оспаривали мнение о возможности определения родства Кенневикского человека по чертам скелета, являвшегося довольно необычным во многих отношениях. Отмечалось, что даже попытки установить возраст этого человека на момент смерти не привели к однозначным результатам, давая разброс от 38 до 55 лет. Отдельные черты скелета (изогнутые кости конечностей) вообще имеют мало аналогий среди современных человеческих популяций и связаны, скорее всего, с образом жизни этого человека. Согласно анализу изотопного состава костей, ранее сделанному другой научной группой, последние 20 лет своей жизни

Кенневикский человек питался морскими млекопитающими и пил воду ледникового происхождения, в ту пору доступную только на Аляске, за тысячи километров от места его захоронения. При этом его родство с нынешними аляскинскими индейцами оказалось меньше, чем с группой колвилльских индейцев, живущих ныне рядом с местом его погребения. Группа ученых во главе с Мортеном Расмуссеном (Morten Rasmussen) из Копенгагенского университета провела секвенирование генома Кенневикского человека. Анализ показал, что в действительности индейские племена близ места обнаружения скелета являются носителями сходных с ним генов. Для анализа исследователи взяли 200 мг вещества из внутренних частей пястной кости скелета. В итоге выяснилось, что Кенневикский человек принадлежал к Y-хромосомной гаплогруппе Q-M3 (передается по мужской линии), характерной для коренного населения обеих Америк, и за их пределами встречается только среди эвенов — народа, проживающего в России к востоку от Лены до Камчатки и Чукотки. По митохондриальной ДНК (передается по женской линии) он относился к гаплогруппе X2a, также характерной для Нового Света. За его пределами она практически не распространена, хотя предковая для нее гаплогруппа X2* иногда встречается среди эвенков. Авторы делают заключение о том, что генетически останки весьма близки пяти племенам конфедерации Колвилла, проживающим в штате Вашингтон, поблизости от места обнаружения рассматриваемого скелета. Другими близкими к нему группами являются оджибве и алгонкины, живущие ближе к противоположному, восточному побережью США. После выхода работы Расмуссена и соавторов у колвилльских пяти племен могут появиться основания требовать выдачи и захоронения останков Кенневикского человека.



Скелет Кенневикского человека / Chip Clark/Smithsonian National Museum

PNAS Early Edition • Биология

У зубатых китов удивительным образом утеряны ключевые антивирусные белки Mx1 и Mx2

Mx1 and Mx2 key antiviral proteins are surprisingly lost in toothed whales. Benjamin A. Braun, Amir Marcovitz, J. Gray Camp, Robin Jia, Gill Bejerano. PNAS Early Edition. 2015. Published ahead of print June 15, 2015, doi: 10.1073/pnas.1501844112.

Группа генетиков из Медицинской школы Стэнфордского университета обнаружила, что у представителей нескольких семейств зубатых китов (дельфины, касатки, кашалоты) имеются разнообразные мутации в генах Mx1 и Mx2, не позволяющие синтезировать ключевые для иммунной защиты от вирусных инфекций белки. Исследование состояло из двух этапов. На первом этапе ученые проанализировали геномы 60 различных видов млекопитающих. Среди них были четыре представителя различных семейств подотряда зубатых китов (*Odontoceti*), представители подотряда усатых китов (*Mysticeti*), а также множество иных млекопитающих, включая даже коров и человека. Выяснилось, что только у зубатых китов гены Mx1 и Mx2 отсутствуют полностью, либо в них наблюдаются разного рода мутации, потенциально исключающие возможность производства функциональных белков. У всех остальных млекопитающих, в том числе и усатых китов, никаких изменений в этих генах не наблюдалось. Чтобы проверить гипотезу о нефункциональности Mx1 и Mx2, генетики дополнительно провели транскриптомный анализ, позволивший установить, какие гены у зубатых китов экспрессированы, а какие — нет. Первоначальное мнение об отсутствии выработки связанных с обозначенными генами белков полностью подтвердилось. Ген Mx1 кодирует белок, который у человека и, вероятно, других млекопитающих играет важ-



Касатки — представители подотряда зубатых китов / Robert Pittman/ NOAA

нейшую роль в ингибировании РНК и ДНК ортомиксовирусов (грипп типа А), парамиксовирусов (корь) и гепатитов (гепатит В). В 2013 г. было обнаружено, что ген Mx2 кодирует белок, влияющий на поведение вируса иммунодефицита человека в клетках, препятствуя его репликации и процессу размножения. Существует мнение, что схожие механизмы защиты присутствуют у всех млекопитающих. Наличие Mx-генов у усатых китов говорит, что, скорее всего, их исчезновение или мутации произошли у общего предка обоих подотрядов незадолго после их разделения. Причиной его мог служить какой-то мощный вирус, использовавший эти гены в своих целях. Таким образом, после массовой эпидемии выжили только особи с поврежденными и нефункциональными Mx-генами. Однако остается загадкой, как зубатые киты противодействовали на протяжении 33-37 млн лет другим вирусным инфекциям. По мнению авторов, они выработали какой-то иной защитный механизм, который еще предстоит обнаружить.

PNAS Early Edition • Палеонтология

Экстремальная экосистемная нестабильность подавляла доминантное развитие тропических динозавров на протяжении 30 млн лет

Extreme ecosystem instability suppressed tropical dinosaur dominance for 30 million years. Jessica H. Whiteside, Sofie Lindström, Randall B. Irmis, Ian J. Glasspool, Morgan F. Schaller, Maria Dunlavey, Sterling J. Nesbitt, Nathan D. Smith, Alan H. Turner. PNAS Early Edition. 2015. Published ahead of print June 15, 2015, doi: 10.1073/pnas.1505252112.

Известно, что первые динозавры появились около 230 млн лет назад, однако практически до конца триасового периода они предпочитали жить вне тропической и экваториальной

зон. На материках, расположенных в тот период в районе экватора, находят лишь редкие останки небольших хищных видов динозавров. Останки больших и травоядных динозавров практически не встречаются в этих местах, при этом в регионах, расположенных в триасовое время далеко от экватора, останки травоядных динозавров не единичны. Авторы статьи предполагают, что частые пожары, нехватка продовольствия и жесткие климатические условия могут объяснить тот факт, что динозаврам не удавалось заселить тропики более 30 млн лет после своего появления на планете. Палеоэкологические исследования проводились учеными на примере формации Чинле (Chinle formation) в районе Ghost Ranch в северной части шт. Нью-Мексико (США). Слои формации содержат окаменелости животных и рыб, уголь, оставшийся после древних пожаров, стабильные изотопы органических веществ почвы и карбонатные конкреции. Все полученные данные дополняют друг друга и указывают на наличие в районе Ghost Ranch в триасовый период тропического климата.

Динозавры здесь в это время составляли не более 15% фауны, а в пищевой цепи доминировали древние рептилии. Авторы установили, что динозавры, которым удавалось выживать в местном климате, были маленькими хищниками. Большие травоядные особи с длинными шеями (например, апатозавры или диплодоки) отсутствовали полностью, хотя в более северных широтах их было достаточно много. Таким огромным животным в данной местности не хватало растительной пищи. Прослойки древесного угля, обнаруженные в осадочных породах формации Чинле, указывают на многочисленные пожары (причем некоторые из них были невероятно обширными), которые привели не только к исчезновению многих видов растений, но и к повреждению почвы и повышенной эрозии. Одновременно с этим, находки пыльцы в проанализированных отложениях указывают на частую смену растительности. Слои, в которых доминируют папоротники, сменяются теми, где пыльца принадлежит в основном хвойным голосеменным растениям. Среднегодовые температуры в Ghost Ranch в позднем триасе достигали 28 °C, а уровень углекислого газа колебался в диапазоне 1200–2400 ppm (для



Реконструкция облика целофиза — небольшого хищного динозавра / Firsfron/wikipedia.org

сравнения, сегодняшний, тоже весьма высокий уровень, составляет 400 ppm). Непостоянный суровый климат с периодическими лесными пожарами привел к тому, что выжить в среде «экстремальной нестабильности» могли лишь небольшие двуногие плотоядные динозавры вроде целофизов.

Science Advances • Биология

Повышенное оптическое отражение и рассеяние тепла предохраняют серебряных муравьев от перегрева

Keeping cool: Enhanced optical reflection and heat dissipation in silver ants. Norman Nan Shi, Cheng-Chia Tsai, Fernando Camino, Gary D. Bernard, Nanfang Yu, Rüdiger Wehner. Science Advances. Published Online June 18, 2015. DOI: 10.1126/science.aab3564.

Сахарские серебряные муравьи *Cataglyphis bombycina* — один из самых устойчивых к высокой температуре видов живых существ. Они живут за счет собирания и поедания трупов других насекомых или мелких животных, погибших в пустыне от перегрева или обезвоживания. На поверхности эти муравьи появляются лишь тогда, когда жара заставляет прятаться в норах ящериц, охотящихся на этот вид насекомых. Исследователи под руководством Наньфана Юя (Nanfang Yu) из Колумбийского университета выяснили, что волоски муравьев-бегунков вида *Cataglyphis bombycina* работают как радиаторы охлаждения, позволяющие им эффективно излучать в инфракрасном диапазоне и тем самым не перегреваться в условиях пустыни Сахара. Авторы изучили механизмы терморегуляции, критичные для выживания серебряных сахарских муравьев-бегунков, наблюдая последних в инфракрасном спектре. Выяснилось, что волоски серебряного цвета, покрывающие верхнюю часть туловища и голову насекомых, хорошо отражают излучение в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. В то же время, только этим нельзя было объяснить, как именно насекомые остаются активными в условиях, когда все остальные живые организмы пустыни вынуждены скрываться в своих норах. В ходе наблюдений ученые выяснили, что те же особые во-



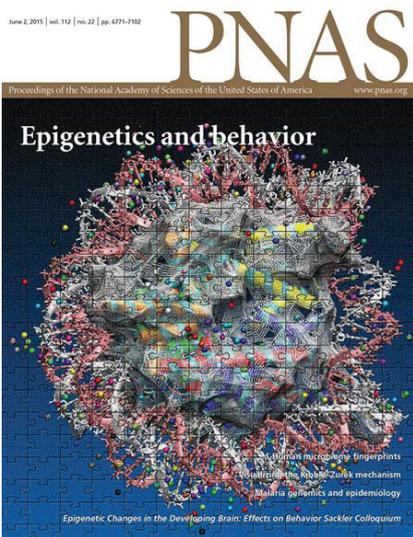
Cataglyphis bombycina, вид сверху / Norman Nan Shi, Nanfang Yu, Columbia Engineering

лоски треугольного сечения на нижней части тела муравьев-бегунков играют функцию противоположную той, что они выполняют на верхней части тела. Снизу волоски активно излучают в среднем инфракрасном диапазоне, отдавая тепло в окружающую среду в условиях сахарского дня, когда системы терморегуляции остальных животных не имеют возможности сделать это. В ходе эксперимента выяснилось, что после удаления таких волосков нагрев серебряного муравья-бегунка существенно возрастает при той же температуре и освещении. Как полагают исследователи, именно за счет комбинации высокой отражательной способности волосков и их способности работать как пассивные радиаторы охлаждения этот вид может вести свой необычный образ жизни, оставаясь активным при температуре окружающей среды до 70 °C. Сами муравьи погибают при нагреве тела выше 53,6 °C. Ученые надеются, что их исследование поможет созданию новых, более эффективных систем пассивного охлаждения для электроники.

Vol. 522. No 7554 Vol. 521. No 7553
4 июня 2015 года 28 мая 2015 года



Vol. 112. No 22 Vol. 112. No 21
2 июня 2015 года 26 мая 2015 года



Vol. 348. No 6239 Vol. 348. No 6238
5 июня 2015 года 29 мая 2015 года



Nature · PNAS · Science: рефераты статей

15 **Астрономия**

16 **Физика**

18 **Химия**

19 **Науки о Земле и экология**

23 **Антропология и история**

24 **Биология**

33 **Медицина**

37 **Нейронауки и психология**

43 **Социальные науки**

45 **Технологии и материалы**

Астрономия

Резонансные взаимодействия и хаотическое вращение малых спутников Плутона

Resonant interactions and chaotic rotation of Pluto's small moons. M. R. Showalter, D. P. Hamilton. *Nature*. 2015. Vol. 522. No 7554. P. 45–49.

Четыре малых спутника Плутона — Стикс, Никта, Кербер и Гидра — обращаются по орбитам, близким к экваториальным круговым, вокруг центральной двойной планеты, состоящей из самого Плутона и его главного спутника — Харона, масса которого составляет 11% от массы Плутона. Для спутника это очень много. Если определить положение общего центра тяжести Плутона и Харона, то окажется, что он лежит за пределами Плутона. Поэтому астрономы все чаще рассматривают Плутон и Харон не как планету и ее спутник, а как двойную планетную систему. Вероятно, Харон сформировался на заре существования Солнечной системы в результате крупного столкновения небесных тел. И обломки этих космических объектов, возможно, сегодня являются малыми лунами Плутона. Авторы проанализировали данные, собранные телескопом Хаббл в течение 10 лет, и пришли к выводу, что спутники Плутона, двигаясь по своим орбитам, вращаются хаотически, иногда меняя скорость и направление вращения. К примеру, Никт и Гидра движутся по своим орбитам, совершая вращение в разных направлениях, покачиваясь и постоянно переворачиваясь, то есть вращаются хаотически вокруг своих осей. Подобное хаотическое движение вызвано изменениями в гравитационном поле, создаваемом при вращении двойной планеты. Масса каждого из малых спутников составляет менее 0,001% массы Плутона. Притяжение от двух компонентов планетной си-

стемы Плутон–Харон, которые вращаются вокруг общего центра масс, заставляет Гидру, Никту, Кербер и Стикс то ускорять, то замедлять вращение вокруг своей оси, а порой — и вращаться в обратную сторону. Полученные при помощи телескопа данные также свидетельствуют о том, что имеющие продолговатую, а не сферическую форму Никт и Гидра, являются достаточно светлыми объектами в системе Плутона. В отличие от них, Кербер, орбита которого проходит между Никтом и Гидрой, является более темным объектом, что указывает на то, что он состоит из иных материалов. В статье сообщается также об обнаружении резонансных взаимодействий между Стиксом, Никтой и Гидрой. Очевидно, их орбиты оказались гравитационно заблокированы в какой-то момент развития Солнечной системы. Этот механизм, известный в механике небесных тел как резонанс трех планет или орбитальный резонанс Лапласа, действует стабильно на протяжении очень длительного периода времени. В частности, подобный механизм связывает спутники Юпитера Ио, Европу и Ганимед. При этом Стикс представляет собой наименьшее тело в тройной системе, и потому, вероятно, этот спутник был захвачен гравитационным полем двух других уже впоследствии. Исследователи уверены, что новые данные о форме, поверхности и движении спутников Плутона будут получены во время пролета космического аппарата НАСА New Horizons мимо Плутона в середине июля 2015 г. New Horizons уже запечатлел три небольших новых спутника Плутона, которые, как выяснилось, движутся по орбите синхронно. Существует большая вероятность, что за орбитой Гидры — самой удаленной из малых лун Плутона — будут обнаружены еще новые его спутники.

В.В. Стрекопытов

Внутреннее ударное столкновение в облаках выбросов соседней радиогалактики

A kiloparsec-scale internal shock collision in the jet of a nearby radio galaxy. Eileen T. Meyer, Markos Georganopoulos, William B. Sparks, et al. *Nature*. 2015. Vol. 521. No 7553. P. 495–497.

В результате 20-летних наблюдений с помощью телескопа Hubble авторам удалось реконструировать процесс столкновения двух сгустков плазмы, выброшенных сверхмассивной черной дырой со скоростью близкой к скорости света. Природа таких выбросов, которые помимо черных дыр совершают молодые звезды, до сих пор остается неясной. По одной из версий, материя, падающая на центральный объект, перегревается и выбрасывается вдоль оси вращения, а мощные магнитные поля не дают ей разлетаться в разные стороны. При этом, если поток падающего вещества не является однородным, вместо сплошной струи в пространство вырывается цепочка из отдельных ядер. Именно такое событие было зафиксировано в 1992 г. вблизи гигант-

ской черной дыры NGC 3862, расположенной в центре радиогалактики в 260 млн световых лет от Земли. Уникальность явления состояла в том, что сгустки плазмы были различимы в видимом диапазоне света и могли наблюдаться оптическими приборами. Авторы, исследуя реактивное движение выбросов, сравнили несколько изображений из архива Hubble с новым снимком NGC 3862, полученным в 2014 г. Обнаружилось, что один из сгустков все это время двигался быстрее других (его скорость составляла 98% от скорости света) и, в результате, догнал находящийся впереди него другой сгусток. Итоговое ускоренное видео, составленное из нескольких кадров, снятых с 1994 по 2014 год, демонстрирует впечатляющее столкновение, сопровождающееся слиянием двух ядер в более яркий объект. Наблюдения за выбросами, которые редко удается увидеть в видимом свете, будут продолжены на протяжении следующих десятилетий, пока будет развиваться процесс столкновения. Авторы считают, что новые наблюдения предоставят важные сведения о струях и о потоках высокой энергии в космосе.

В.В. Стрекопытов

Физика

Регулировка атомистического трения с помощью ионно-кристаллического симулятора

Tuning friction atom-by-atom in an ion-crystal simulator. Alexei Bylinskii, Dorian Gangloff, and Vldan Vuletic. Science. 2015. Vol. 348. No 6239. P. 1115–1118.

Трение между упорядоченными атомно-гладкими поверхностями в наномасштабе (наноскопическое трение) часто сопровождается процессами прилипания-скольжения (ПС). При трении в режиме ПС поверхности сначала плотно прилипают друг к другу, аккумулируя потенциальную энергию под действием внешней приложенной силы, пока энергия не превысит критической величины, после чего происходит катастрофическое проскальзывание поверхностей до новой остановки и прилипания. А затем процесс повторяется. Режим ПС наблюдался, начиная с атомарного масштаба — в атомно-силовых микроскопах, и кончая километровым масштабом — при землетрясениях. Для проверки атомистических моделей процессов ПС в работе была создана синтетическая поверхность для изучения наноскопического трения между лазерно-охлажденным кулоновским кристаллом индивидуальных ионов (движущимся объектом) и периодическим потенциалом оптической решетки — неподвижным объектом. Статическая сила трения и энергия диссипации измерялись отдельно для каждого иона, благодаря высокому пространственному и временному разрешению. Период оптической решетки составлял $a = 185$ нм. Для создания модельной системы ионы $^{174}\text{Yb}^+$ охлаждались до температуры порядка нескольких мК и загружались в линейную оптическую ловушку Пауля с гармоническим удерживающим потенциалом. Ре-

зультирующий потенциал, действующий на отдельный ион, имел вид $V/(m\omega_0^2 a^2) = 0,5(x_i - X)^2/a^2 + (\eta/4\pi^2)\cos(2\pi x_i/a)$, где m — масса иона, ω_0 — частота колебаний иона в гармоническом потенциале ловушки, x_i — координата иона, X — координата центра ловушки, $\eta = (\omega_L/\omega_0)^2$ — параметр гофрирования, ω_L — частота колебаний относительно узла оптической решетки. Величина параметра η изменялась в широких пределах, варьируя интенсивность лазерных пучков и величину статического электрического поля. Перемещение центра ловушки под действием силы $F(t)$ по закону $X(t) = F(t)/(m\omega_0^2)$ вызывает относительное движение «ионного кристалла» со скоростью, зависящей от $F(t)$. Для устранения нагрева, вызванного трением, ионы непрерывно охлаждались лазерными пучками до температуры значительно ниже, чем глубина потенциальной ямы оптической ловушки (в энергетических единицах). Количество и положения ионов контролировались независимым образом с помощью измерения интенсивности рамановского рассеяния света ионами. Интенсивность рассеяния возрастает при «прилипании» ионов к узлам решетки, и уменьшается при «скольжении». Типичное расстояние между ионами составляло 6 мкм. В результате проведенных экспериментов показано, что трение в режиме ПС можно регулировать в пределах от максимального до нулевого в зависимости от расположения ионов по отношению к оптической решетке. Изменяя число ионов, была установлена сильная зависимость трения от их структурного рассогласования, аналогичная известным многочастичным моделям. Такая зависимость наблюдалась уже на уровне двух-трех ионов. Модельная система, использованная в работе, позволит проводить систематическое микроскопическое исследование механизмов трения даже в квантовом многочастичном режиме.

Г.В. Дедков

Наблюдение редкого распада $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ по данным совместных анализов групп CMS и LHCb

Observation of the rare $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ decay from the combined analysis of CMS and LHCb data. CMS Collaboration & LHCb Collaboration. Nature. 2015. Vol. 522. No 7554. P. 68–72.

Физики ЦЕРН из коллабораций CMS и LHCb обнаружили в данных, собранных Большим адронным коллайдером за первый этап его работы, следы распадов так называемых «странных» нейтральных В-мезонов, частота и соотношение которых указали на справедливость стандартной модели физики. Поиск новых частиц, а также новых явлений, выходящих за границы существующей общепринятой теории, так называемой стандартной модели физики, можно вести напрямую, пытаясь зафиксировать следы рождения новых частиц при столкновении других частиц, разогнанных до высоких энергий. Таким образом был открыт три года назад бозон Хиггса. Если энергии гипотетических частиц слишком высоки и недоступны для их получения на коллайдере, есть и другой способ — искать присутствие новых частиц непрямым способом, через их взаимодействия с кварками при распаде частиц. Именно для этого был создан детектор LHCb. Работающие на нем физики изучают поведение частиц, в состав которых входит b-кварк (от английского «beauty»). Нейтральный «странный» В-мезон состоит из s-кварка («странного», strange) и b-кварка. Мюон можно представить себе как тяжелый электрон, в 200 раз тяжелее обычного. В природе мюоны образуются при взаимодействии космических лучей с частицами в верхних слоях атмосферы и быстро распадаются. Стандартная модель предсказывает, что распад В-мезона на два

мюона должен быть крайне редким событием. Его вероятность составляет 3×10^{-9} степени — это означает, что так распадутся лишь 3 частицы из 10 миллиардов. Подобный распад «обычного» нейтрального В-мезона происходит еще реже — один раз на 10 миллиардов. Первые следы подобных распадов ученые, работающие с детектором LHCb, стали замечать еще в декабре 2012 г. Предварительный анализ данных, с одной стороны, показал, что частота распадов «странных» В-мезонов и соотношение между распадами «странных» и «обычных» нейтральных частиц в точности соответствовал предсказаниям стандартной модели, а с другой — раскрыл странности в характере продуктов распада нейтральных В-мезонов, несовместимыми с ней. Изначально ученые ЦЕРН не могли заявить о совершении открытия, так как его статистическая значимость была ниже «волшебной» для физики частиц отметки в 5 Δ . Для преодоления этого барьера представители LHCb объединили усилия с коллаборацией CMS, на детекторах которой тоже были найдены следы распадов В-мезонов. Объединение результатов работы LHCb и CMS прошло успешно: частота распадов и их соотношение не изменилось, а статистическая значимость выросла до показателя в 6,2 Δ для «странных» В-мезонов и до 3,2 Δ — для «обычных» нейтральных. В общей сложности за первый период работы БАК ученые зафиксировали около 100 распадов «странных» нейтральных В-мезонов, и около 10 распадов нейтральных В-мезонов. Полученные результаты, как констатируют физики, подтверждают то, что стандартная модель корректно описывает этот редчайший вид распада элементарных частиц. Данное открытие, как уже отмечалось в 2012 г., почти полностью исключает вероятность того, что теории суперсимметрии, расширяющие стандартную физику, могут быть верными.

В.В. Стрекопытов

Химия

Синтез и описание $P_2N_3^-$ — ароматического иона, состоящего из фосфора и азота

Synthesis and characterization of $P_2N_3^-$: An aromatic ion composed of phosphorus and nitrogen. Alexandra Velian, Christopher C. Cummins. Science. 2015. Vol. 348. No 6238. P. 1001–1004.

В статье приводится описание синтезированного авторами неорганического аниона, обладающего ароматичностью — особым электронным состоянием молекул, замкнутых в кольцо или цикл. Оно характеризуется, в частности, образованием единого электронного облака вне плоскости цикла, объединяющего π -электроны. Ароматические молекулы, по сравнению с неароматическими аналогами, обладают высокой химической устойчивостью. К примеру, разрушить двойную связь в бензоле гораздо сложнее, чем в восьмиугольном циклооктатетраене (у него на два электрона больше, чем у бензола, поэтому он не ароматичен). Соединения, обладающие этим свойством, в большинстве случаев являются органическими — это связано со способностью углерода легко образовывать разнообразные каркасы. Но из этого правила есть исключения, например, боразол — неорганическое шестичленное циклическое

соединение, состоящее из чередующихся атомов азота и бора. Несмотря на то, что в нем нет формальных двойных связей, его ароматичность достигается благодаря тому, что каждый из атомов азота в кольце обладает «лишней», не участвующей в образовании связей, парой электронов, а у бора есть вакантная орбиталь, способная их принять, обеспечив сопряжение всех электронных облаков. В итоге, у системы образуется общее кольцевое электронное облако, содержащее $3 \times 2 = 6$ электронов, соответствующее критерию ароматичности. Авторам удалось синтезировать новый неорганический ароматический анион, состоящий из трех атомов N и двух атомов P, формирующих пятичленный цикл. Для его получения использовалась реакция между азидом натрия (NaN_3), содержащим линейный фрагмент из трех атомов N, и дифосфорным производным антрацена, способным легко высвобождать частицу P_2 . В результате так называемой click-реакции авторы получили бесцветные кристаллы натриевой соли этого аниона, а благодаря их рентгеновскому анализу удалось определить точное строение пятиугольной частицы. Дополнительные исследования методом ядерного магнитного резонанса на ядрах азота и фосфора позволили химикам окончательно убедиться в ароматичности иона $P_2N_3^-$.

В.В. Стрекопытов

Каталитический синтез нуклеозидов и других пребиотических производных формамида при протонном облучении метеоритов

Meteorite-catalyzed syntheses of nucleosides and of other prebiotic compounds from formamide under proton irradiation. Raffaele Saladino, Eleonora Carota, Giorgia Botta, Mikhail Kapralov, Gennady N. Timoshenko, Alexei Y. Rozanov, Eugene Krasavin, Ernesto Di Mauro. PNAS. 2015. Vol. 112. No 21. E2746–E2755.

Начало экспериментальным исследованиям самопроизвольного зарождения жизни на Земле положил в 1953 г. так называемый эксперимент Миллера-Юри, в ходе которого под действием электрических разрядов (имитация молний) наблюдался спонтанный синтез аминокислот в газообразной смеси, аналогичной по составу первичной атмосфере Земли. Авторы считают, что жизнь на Земле появилась благодаря метеоритам, а первичным материалом являлись трехатомные молекулы цианистоводородной кислоты и воды, а также производный от них формамид, широко распространенный в межзвездной среде. В лабораторных условиях ученые подвергли молекулы формамида облучению протонами высоких

энергий — они представлены в космосе довольно широко и вполне могли явиться фактором создания необходимых условий для запуска определенных каталитических процессов, в ходе которых возникли более сложные пребиотические структуры. Во время эксперимента наблюдался спонтанный синтез, в результате которого удалось получить сложные пребиотические соединения, участвующие в построении ДНК и РНК, — нуклеооснования, сложные сахара, карбоксильные кислоты, аминокислоты и, главное, — нуклеозиды (цитидин, уридин, аденозин и тимидин). Для облучения использовались метеориты всех четырех разновидностей — железные, железо-каменные, хондритовые и ахондритовые. Продукты катализа изучались с помощью методов масс-спектрометрии. Обнаруженные HCN олигомеры свидетельствуют об образовании цианид-радикалов ($CN\cdot$), необходимых для синтеза нуклеооснований. Авторы отвергают предположение, согласно которому первые живые организмы зародились в космосе, указывая на то, что для данного процесса необходима защищенная среда, которой являлась Земля. В то же время, они не исключают тот факт, что вместе с астероидами на поверхность нашей планеты могли попасть и первые микроорганизмы, которые под воздействием формамида начали мутировать, превращаясь в более сложные образования.

В.В. Стрекопытов

Науки о Земле и экология

Заявленные и незаявленные данные по выбросам гидрофторуглеродов и их соответствие атмосферным наблюдениям

Reconciling reported and unreported HFC emissions with atmospheric observations. Mark F. Lunt, Matthew Rigby, Anita L. Ganesan, et al. PNAS. 2015. Vol. 112. No 19. P. 5927–5931.

Гидрофторуглероды (HFCs) являются сильнейшими парниковыми газами, выбросы которых в атмосферу постоянно растут по мере того, как HFCs приходят на смену хлорфторуглеродам и гидрохлорфторуглеродам. Эти газообразные вещества используются, прежде всего, в холодильниках и кондиционерах, а также в качестве пенообразующих агентов в топливных аэрозолях и ингибиторах горения. Несмотря на то, что HFCs не разрушают озоновый слой, они подпадают под действие Киотского протокола Рамочной конвенции ООН об изменении климата (UNFCCC). В связи с этим раздаются призывы к прекращению использования этих газов. Для того чтобы ответственно подходить к проблеме HFCs, необходимо обладать полной и достоверной информацией о реальном состоянии, уровне и динамике их эмиссии. На сегодняшний день такая информация отсутствует.

Авторы, используя данные по концентрациям в атмосфере пяти основных HFCs, попытались оценить достоверность прогнозов атмосферных климатических моделей и сравнить их с официально публикуемыми данными по выбросам. В качестве исходных данных привлекались результаты измерений, выполненных в рамках программы AGAGE (Advanced Global Atmospheric Gases Experiment, Прогрессивный глобальный эксперимент по мониторингу атмосферных газов), и данные Национального института изучения окружающей среды Японии. Результаты показали, что общая эмиссия пяти основных HFCs, выраженная в эквиваленте CO₂, выросла с 198 × 10¹² г/год в 2007 г. до 275 × 10¹² г/год в 2012 г. Эти значения существенно выше тех, которые приводятся в отчетах UNFCCC. Если учитывать тот факт, что данные, приводимые UNFCCC, отражают только официальную статистику выбросов, составленную на основе ежегодных отчетов, публикуемых 42 развитыми странами, то вся разница между официальными данными и результатами атмосферных наблюдений приходится на страны, не проводящие регулярных наблюдений. Например, по такому важному гидрофторуглероду как HFC-134a официально заявляется только около 79% выбросов. По остальным HFCs ситуация обстоит еще хуже.

В.В. Стрекопытов

Наблюдения за уровнем моря свидетельствуют о влиянии океана на декадные климатические вариации в Атлантике

Ocean impact on decadal Atlantic climate variability revealed by sea-level observations. Gerard D. McCarthy, Ivan D. Haigh, Joël J.-M. Hirschi, Jeremy P. Grist, David A. Smeed. Nature. 2015. Vol. 521. No 7553. P. 508–510.

Характерной чертой климата бассейна Атлантического океана являются декадные (продолжительностью несколько десятилетий) вариации, особенно ярко проявившиеся в так называемых атлантических мультидекадных осцилляциях (АМО) температур морской поверхности. При этом позитивная фаза АМО соответствует теплой аномалии поверхностных температур в Северной Атлантике, а негативная – холодной. В свою очередь, цикличность АМО связана с декадными флуктуациями таких климатических факторов, как количество сезонных осадков в Индии, Европе и регионе Сахеля, частота и сила атлантических ураганов, а также вариации глобальных температур. Традиционно считается, что смена

фаз АМО обусловлена сменой режима океанических циркуляций и параметров связанного с ними теплопереноса. Однако до последнего времени отсутствовали прямые наблюдения, которые могли бы подтвердить или опровергнуть наличие подобных циркуляций достаточной протяженности. Используя данные наблюдений за уровнем моря вдоль восточного побережья США, авторы приводят свидетельства в пользу гипотезы о связи между океаническими циркуляциями и АМО. Показано, что океаническая циркуляция отвечает на атлантическое атмосферное усиление (Североатлантическую атмосферную осцилляцию) изменениями течений в средних широтах (между тропическим и северным полярным кругами). Именно эти изменения определяют декадную эволюцию режима теплопереноса в Северной Атлантике и, как следствие, – фазу АМО. При снижении интенсивности Атлантической меридиональной циркуляции (АМОС) АМО переходит в негативную фазу, в период которой может наблюдаться временное ослабление общего тренда роста глобальных температур, однако в системе при этом накапливается компенсаторный эффект. Что касается уровня моря, то в течение негативной фазы АМО вдоль восточного побережья США наблюдается увеличение темпов его подъема.

В.В. Стрекопытов

Увеличение продукции метана в тропиках в ответ на разгрузку айсбергов в Северной Атлантике

Enhanced tropical methane production in response to iceberg discharge in the North Atlantic. Rachael H. Rhodes, Edward J. Brook, John C. H. Chiang, Thomas Blunier, Olivia J. Maselli, Joseph R. McConnell, Daniele Romanini, Jeffrey P. Severinghaus. *Science*. 2015. Vol. 348. No 6238. P. 1016–1019.

До сих пор остаются непонятными причины и механизмы резких климатических изменений, имевших место в течение последнего ледникового периода. Одна из сложностей заключается в определении возраста обломочного материала, принесенного ледниками во время событий Хайнриха в Северной Атлантике, — мощной разгрузки в океан айсбергов, отколовшихся от материкового ледникового щита. Эти события имели огромное влияние на климат и биогеохимические процессы в масштабах всей планеты, однако непонятно, события Хайнриха сами были причиной глобальных климатических изменений или — отражением каких-

либо других событий. Не ясно также, как связать резкие фазовые климатические осцилляции в Северном полушарии — так называемые события Дансгора-Эшера — с циклами, фиксируемыми в ледяном керне Гренландии. На основании изучения новых образцов ледяного керна авторы с высокой временной точностью восстановили историю колебаний содержания метана в атмосфере Земли на протяжении последнего ледникового периода. Были обнаружены резкие скачки метана, связанные по времени со стадиями Хайнриха 1, 2, 4 и 5, не коррелирующие при этом с температурными прокси-данными по Гренландии. Используя эвристическую модель распределения тропических осадков, авторы показывают, что события Хайнриха в Гудзоновом проливе могли стать причиной увеличения дождей над материковыми территориями Южного полушария, что привело к повышению продуктивности метана во влажной тропической зоне. Результаты моделирования показывают, что последствия событий Хайнриха могли оказывать влияние на глобальный климат в течение 740–1520 лет.

В.В. Стрекопытов

Динамика утончения ледников южной части Антарктического полуострова

Dynamic thinning of glaciers on the Southern Antarctic Peninsula. B. Wouters, A. Martin-Español, V. Helm, T. Flament, J. M. van Wessem, S. R. M. Ligtenberg, M. R. van den Broeke, J. L. Bamber. *Science*. 2015. Vol. 348. No 6237. P. 899–903.

Состояние ледникового покрова Антарктики является одним из важнейших индикаторов климатических изменений на планете. Последние несколько десятилетий отмечается постоянное утончение и отступление ледников вдоль всего побережья северной части Антарктического полуострова, а также увеличение темпов разгрузки наземных ледников, особенно залегающих в глубоких впадинах. Сами по себе ледники северной части полуострова не представляют серьезной угрозы для уровня Мирового океана, однако их таяние открывает доступ к мощным ледникам южной части. Все больше фактов свидетельствуют о том, насколько важна для шельфовых ледников Антарктики возможность опираться на

материковые льды, особенно когда последние лежат на континентальном основании, расположенном ниже уровня моря. Полностью справедливо это и для ледникового покрова южной части Антарктического полуострова, где скальное ложе ледников уходит вглубь материка под большим наклоном. Такая геометрия основания создает серьезную угрозу нестабильности как для шельфовых, так и для материковых ледников. Используя данные спутниковой альтиметрии и гравиметрических наблюдений, авторы показали, что начиная с 2009 г. ледники района постоянно находятся в нестабильном состоянии. И, если потеря массы ледниками с шельфовыми языками в начале 2000-х годов была близка к нулю, то сейчас она составляет 56 ± 8 Гт/год. Большая часть вклада Антарктики в повышение уровня Мирового океана обеспечивается именно за счет таяния ледников Антарктического полуострова. Причину повсеместного и все ускоряющегося таяния ледников полуострова при отсутствии какого-либо видимого атмосферного воздействия, очевидно, следует искать в механизмах, связанных с океаническими процессами.

В.В. Стрекопытов

Усиление арктического потепления, связанное с реакцией фитопланктона на парниковый эффект

Amplified Arctic warming by phytoplankton under greenhouse warming. Jong-Yeon Park, Jong-Seong Kug, Jürgen Bader, Rebecca Rolph, Minh Kwon. *PNAS*. 2015. Vol. 112. No 19. P. 5921–5926.

Благодаря своей роли в глобальной экосистеме Мирового океана, фитопланктон традиционно находится в центре внимания ученых, изучающих экологию Земли. Климатические модели последнего поколения позволяют количественно оценить будущие изменения, обусловленные действием обратных связей внутри сопряженных физико-экологических систем. В работе рассматривается такой необычный аспект этих систем, как влияние фитопланктона на геофизические параметры, определяющие климатические изменения. Хлорофилл и другие пигменты фитопланктона способны поглощать солнечную радиацию, которая преобразуется затем в биологическое тепло, служащее дополнительным ис-

точником нагрева поверхностных слоев океана. Авторы провели серию экспериментов, данные которых были обработаны в рамках полностью связанной модели «океан–атмосфера», учитывающей, в том числе, взаимодействия внутри океанских экосистем. Результаты моделирования показали, что ответная реакция фитопланктона на усиление глобального парникового эффекта вызовет еще большее потепление в Арктике, увеличив его темпы примерно на 20%. Спровоцированное потеплением таяние льдов и рост проникающей коротковолновой солнечной радиации приведут к удлинению вегетативного сезона фитопланктона в Арктике. В свою очередь, рост биомассы в верхних слоях океана станет фактором дополнительного нагрева этих слоев, создав эффект петли обратной связи потепления. Справедливости ради, стоит отметить, что наряду с этой, негативной, обратной связью между парниковым эффектом и реакцией фитопланктона, существует и другая — положительная, обусловленная ролью фитопланктона в фиксации углерода, что снижает концентрацию в атмосфере двуокиси углерода (CO_2) — главного парникового газа.

В.В. Стрекопытов

Дренаж супрагляциальных озер Гренландии связан с гидрологически обусловленным базальным скольжением

Greenland supraglacial lake drainages triggered by hydrologically induced basal slip. Laura A. Stevens, Mark D. Behn, Jeffrey J. McGuire, Sarah B. Das, Ian Joughin, Thomas Herring, David E. Shean, Matt A. King. Nature. 2015. Vol. 522. No 7554. P. 73–76.

Под воздействием талых вод трещины, расположенные под супрагляциальными озерами Гренландии, быстро расширяются и распространяются вглубь. Огромные объемы поверхностных вод устремляются по ним к основанию ледникового щита. Авторы при помощи данных GPS-наблюдений за период 2011–2013 гг. выяснили, что разломы под озерами возникают в результате движения ледникового покрова, а эти движения, связанные с базальным скольжением, в свою очередь, вызваны просачиванием талой воды в основание ледникового покрова. Для проведения исследования использовались

16 станций GPS, которые следили за исчезновением воды в озерах. Спутниковые снимки показали, что большинство супрагляциальных озер опустошаются медленно, но из 13% из них вода уходила менее чем за 24 часа. Было обнаружено, что за 6–12 часов до исчезновения воды из таких озер происходили определенные подвижки. Оказалось, что этого было достаточно, чтобы возросли напряжения в ледниковом покрове и в нем образовались протяженные вертикальные трещины растяжения. Двигаясь по разломам, поверхностная вода не разгружается в океан, а чаще всего остается в толще ледника, образуя большие подледные озера. Возможно, в том числе поэтому прибрежные ледники тают быстрее тех, что находятся в глубине острова. Следовательно, не весь объем талых супрагляциальных вод сразу оказывается в океане, влияя на рост уровня моря. Предполагается, что исследование может сыграть большую роль в изучении движения талых вод, их влияния на повышение уровня моря и позволит определить скорость таяния ледников Гренландии в летний период.

В.В. Стрекопытов

Изотопные данные свидетельствуют о начале биологической азотфиксации с участием Мо-нитрогеназы 3,2 млрд лет назад

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. Vol. 520. No 7549. P. 666–669.

Азот является важнейшим питательным веществом для всех организмов с самого зарождения жизни на Земле. Абиотические процессы, такие как гидротермальное восстановление, фотохимические реакции или атмосферные электрические разряды молний могли способствовать преобразованию атмосферного N_2 в пригодные для усвоения организмами формы азота — NH_4^+ , HCN или NO_x , которые участвуют затем в биогенных процессах азотфиксации. Однако вряд ли эти процессы были сильно развиты в архее в силу крайней ограниченности первичной биосферы Земли. Од-

ним из важнейших событий геологической истории, повлиявших на активное распространение жизни, было появление нитрогеназ — комплекса ферментов, осуществляющих процесс фиксации атмосферного азота с преобразованием N_2 в органический NH_4^+ . При этом время появления нитрогеназ было до конца не ясно. Авторы изучили изотопные отношения азота в древних (3,2–2,75 млн лет), первично осадочных (морских и речных), породах разной степени метаморфизма: от пренит-пумпеллиитовой до зеленокаменной фаций. Медианные значения $\delta^{15}N$ в этих породах составили $0,0 \pm 1,2\%$. Подобные отношения не могли возникнуть лишь в результате абиотических процессов или потребовали бы значительно отрицательного фракционирования. Авторы предполагают, что 3,2 млрд лет назад на Земле начались процессы биогенной азотфиксации с участием Мо-нитрогеназы. Результаты исследования показывают, что уже в середине архея, задолго до Великой кислородной катастрофы, благодаря присутствию в водах древнего океана биодоступной формы молибдена, была возможна биологическая фиксация азота.

В.В. Стрекопытов

Влияние роста температур на урожайность пшеницы в США

Effect of warming temperatures on US wheat yields. Jesse Tack, Andrew Barkley, Lawton Lanier Nalley. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. P. 6931–6936.

Одно из важнейших направлений современных научных исследований заключается в оценке потенциального влияния глобального потепления и изменений климата на социально-экономическое развитие всего мира. Как правило, в подобных исследованиях осуществляется количественная оценка возможного влияния изменений климата на такие показатели, как ценность сельскохозяйственных земель, рентабельность и эффективность производства. При этом большинство исследований основано на исторических пространственно-временных вариациях погодных параметров, что явно свидетельствует о необходимости понимания влияния экстремальных погодных условий. Если подобные крайности будут измерены неверно, корректная оценка их воздействия так же будет невозможна, что, в конечном счете, может привести к

несостоятельности любых оценок изменений климата. В данном исследовании авторы использовали уникальный набор данных, включающий пробы с различных полей пшеницы штата Канзас, в сочетании с метеорологическими данными для каждого участка за период 1985–2013 год для оценки влияния погоды на урожайность пшеницы на основании метода регрессионного анализа. Полученные результаты показывают, что температурное воздействие существенно меняется на протяжении всего вегетационного периода. Наибольшее влияние на снижение урожайности оказывают осенние морозы и повышенные температуры весной. Также было установлено, что даже с учетом снижения влияния низких температур, глобальное потепление негативно воздействует на урожайность. При этом эффекты, вызванные потеплением, будут частично компенсированы ростом осадков в весенний период. Дальнейшие исследования позволят обеспечить селекционеров, представителей сельскохозяйственных институтов власти и частные предприятия информацией, необходимой для сохранения объемов производства пшеницы в будущем.

Д.Р. Низин

Маловероятно, что геологическое хранение углерода может привести к крупным землетрясениям и просачиванию CO₂ по образующимся при этом трещинам

Geologic carbon storage is unlikely to trigger large earthquakes and reactivate faults through which CO₂ could leak. Victor Vilarrasa, Jesus Carrera. PNAS. 2015. Vol. 112. No 19. P. 5938–5943.

Улавливание и геологическое хранение (подземное хранение в толщах горных пород) углерода – перспективная стратегия консервации диоксида углерода, отделяемого от энергетических источников при их добыче, транспортировке и переработке, которая направлена на борьбу с глобальным потеплением и загрязнением окружающей среды. Ранее высказывалось мнение о том, что геологическое хранение углерода в подземных соляных куполах может спровоцировать индуцированную сейсмическую активность, которая вызовет нарушение однородности толщи покрывающих пород и утечку двуокиси углерода в атмосферу. Авторы утверждают, что возникновение индуцированных землетрясений при геологическом хранении CO₂ маловероятно по следующим причинам:

1) осадочные отложения покрова, которые мягче кристаллического основания, не находятся в состоянии критического напряжения; 2) наименее стабильное состояние толщи пород наблюдается в самом начале закачки, то есть в момент, когда ситуация находится под контролем; 3) растворение CO₂ в рассоле может снизить сверхнапряжения; 4) проникновение в покрывающие породы, если и будет происходить, то не в виде свободной двуокиси углерода, а в виде рассола, при распространении которого по капиллярам пород также будет сниматься сверхнапряжение. Даже при возникновении индуцированной микросейсмичности, вряд ли утечка CO₂ из хранилища будет значительной, так как покрывающие породы содержат высокую долю глинистой составляющей, что снижает их проницаемость. Авторы делают вывод о том, что при правильном выборе места хранения и соблюдении технологий закачки и содержания геологическое хранение углерода в глубинных соляных формациях является перспективным и вполне безопасным способом снижения антропогенных выбросов CO₂ в атмосферу, пагубно влияющих на изменения глобального климата.

В.В. Стрекопытов

Биологические свидетельства в пользу более раннего и многоэтапного возникновения Панамского перешейка

Biological evidence supports an early and complex emergence of the Isthmus of Panama. Christine D. Bacon, Daniele Silvestro, Carlos Jaramillo, Brian Tilston Smith, Prosanta Chakrabarty, Alexandre Antonelli. PNAS. 2015. Vol. 112. No 19. P. 6110–6115.

Закрытие Центральноамериканского пролива и возникновение Панамского перешейка, связывающего между собой Северную и Южную Америки, оказало существенное влияние на глобальный климат, траектории океанских и атмосферных течений, а также на распространение биологических видов. Ранее традиционно считалось, что полное закрытие пролива произошло 3,5 млн лет назад, и именно эта дата использовалась в качестве реперной при оценке времени многих океанографических, климатических и эволюционных событий. Однако полученные в последнее время геологические данные говорят о том, что закрытие пролива было длительным и многоэтапным событием. Авторы в своей работе используют молекулярные и палеонтологические свидетельства оценки времени возникновения биологического обмена

на между двумя Америками, а также соотносят их с геологической информацией. В частности, ими обнаружены две основные волны распространения наземных видов, имевшие место 20 и 6 млн лет назад. В то же время, для морских организмов бассейнов Атлантического и Тихого океанов фиксируются периоды разделения 23 и 7 млн лет назад. Направление и темпы распространения наземных видов имели на обоих континентах симметричный характер вплоть до рубежа 6 млн лет, когда резко возросла миграция южноамериканских видов в Северную Америку. При этом, вариабельность темпов распространения и характер викаризма внутри таксонов не удается объяснить такими экологическими факторами, как тип биома, дисперсионная способность или высотное предпочтение. Косвенные биологические данные подтверждают гипотезу о том, что Панамский перешеек возник на несколько миллионов лет раньше, чем традиционно считалось до последнего времени, а так называемый Великий межамериканский биотический обмен – палеозоогеографическое событие, в ходе которого сухопутная и пресноводная фауна мигрировала из Северной Америки в Южную и наоборот, – был длительным и многоэтапным процессом, начавшимся еще на рубеже олигоцена и миоцена.

В.В. Стрекопытов

Антропология и история

Новый космогенический возраст отложений пещеры Стеркфонтейн: слоя 2, содержащего останки *Australopithecus*, и слоя 5 с орудиями труда олдувайской культуры

New cosmogenic burial ages for Sterkfontein Member 2 *Australopithecus* and Member 5 Oldowan. Darryl E. Granger, Ryan J. Gibbon, Kathleen Kuman, Ronald J. Clarke, Laurent Bruxelles, Marc W. Caffee. Nature. 2015. Vol. 522. No 7554. P. 85–88.

Породы, заполняющие внутреннее пространство пещеры Стеркфонтейн в Южной Африке, являются вмещающим богатейшего в мире скопления костных останков представителей рода *Australopithecus* и древних орудий труда. Еще в 1990-х годах здесь был найден почти полный скелет австралопитека *Australopithecus prometheus*, получившего имя «Маленькая нога» (Little Foot). Долгое время ученые не могли точно определить возраст костей, и прекрасно сохранившаяся находка оставалась в тени знаменитой Люси — самки австралопитека *Australopithecus afarensis*, чьи останки были обнаружены в Эфиопии и датированы 3,2 млн лет. Представители этого рода древних гоминид, которые считаются прямыми эволюционными предками человека, обитали на северо-востоке Африки в промежутке между 2 и 4 млн лет назад. Но, если вулканические породы Восточной Африки легко поддаются датировке, то в случае со Стеркфонтейном традиционно используемые для определения возраста находок методы палеомагнитной стратиграфии и уран-свинцового изотопного анализа оказались неприемлемы из-за того, что сам скелет Little Foot гораздо старше окружающих его мелкозернистых пород — слоистых отложений карбоната кальция и цементирующих брекчий, не образующих стратиграфической последо-

вательности. Эти породы являются по сути дела «наполнителем», заполнившим пространство пещеры в более позднее время. Для определения возраста скелета использовалась техника радиоизотопного анализа с помощью ускорителя и газонаполненного магнитного детектора, который изначально предназначался для исследования солнечного ветра. Метод основан на анализе изотопов ^{26}Al и ^{10}Be в кварцевой породе, окружающей кости. Эти элементы образовались под действием космического излучения, когда порода находилась на поверхности. После того, как частицы породы вымывались водой и попадали на дно пещеры, изотопы начали распадаться. Зная скорость распада, авторы смогли точно установить возраст «наполнителя». Ученые исследовали 11 образцов, собранных в месте обнаружения скелета на протяжении последних 10 лет. В результате они определили, что останки находились в пещере около 3,67 млн лет. А значит, Little Foot старше Люси почти на 500 тыс. лет. Это имеет важное значение для понимания эволюции предков человека. Вид *A. prometheus*, к которому относится Little Foot, отличается от своих современников *A. afarensis* и имеет много общего с более поздними парантропами (*Paranthropus*). У него длинные зубы, плоское лицо и другие отличительные признаки самостоятельного вида. Полученные данные говорят о том, что на обширных территориях Африки в одно и то же время сосуществовали разные виды австралопитеков. Новая техника датирования осадочных пород позволила также определить возраст каменных орудий труда, обнаруженных в пещере Стеркфонтейн, который составил $2,18 \pm 0,21$ млн лет, что говорит о том, что по времени эти орудия относятся к олдувайской культуре. Примерно такой же возраст имеют и другие находки древних орудий труда из Южной Африки (местонахождения Сварткранс и Вандерверк).

В.В. Стрекопытов

Новые виды из Эфиопии расширяют представление о разнообразии среднеплиоценовых гоминин

Newspecies from Ethiopia further expands Middle Pliocene hominin diversity. Yohannes Haile-Selassie, Luis Gibert, Stephanie M. Melillo, Timothy M. Ryan, Mulugeta Alene, Alan Deino, Naomi E. Levin, Gary Scott, Beverly Z. Saylor. Nature. 2015. Vol. 521. No 7553. P. 483–488.

Антропологи долгое время были уверены, что в рамках одного временного промежутка 3-4 млн лет назад жил только один вид предков человека — австралопитек афарский, постепенно эволюционируя. Однако, начиная с 1990-х годов открытие *Australopithecus bahrelghazali* в Чаде и *Kenyanthropus platyops* в Кении, живших одновременно со знаменитой Люси (*Australopithecus afarensis*), поставило эту концепцию под сомнение. Последние два десятилетия среди антропологов ведутся активные дебаты о видовом разнообразии подсемейства гоминин среднего плиоцена, и дальнейшие исследования только подкрепляют гипотезу о том, что в этот пе-

риод в Северо-Восточной Африке сосуществовали несколько видов гоминин. Анализ окаменелостей, обнаруженных авторами в Северной Эфиопии (регион Афар) 4 года назад, позволяет говорить еще один предок современного человека. Найденные фрагменты верхней и нижней челюстей с зубами датируются периодом 3,5–3,3 млн лет. Новый вид назвали *Australopithecus deyiremeda*. *A. deyiremeda*, судя по всему, приходится близким родственником *A. afarensis*, обитавшему в тех же местах в интервале от 3,8–2,9 млн лет назад. Главными отличиями нового вида являются более мощные челюсти, а также небольшие размеры и форма передних зубов. Авторы полагают, что и диета двух родственных видов заметно отличалась. Возраст находок определялся на основании данных региональной геологии, радиометрического датирования и детальных палеомагнитных исследований. Новый вид выводит научные споры о разнообразии ранних гоминин на совершенно другой уровень, хотя некоторые ученые считают, что подобные анатомические расхождения возможны и внутри одного вида.

В.В. Стрекопытов

Биология

Цистеин-кламп ген определяет полярность у эмбриона мошки *Chironomus*

A cysteine-clamp gene drives embryo polarity in the midge *Chironomus*. Jeff Klomp, Derek Athy, Chun Wai Kwan, Natasha I. Bloch, Thomas Sandmann, Steffen Lemke, Urs Schmidt-Ott. Science. 2015. Vol. 348. No 6238. P. 1040–1042.

В формировании передне-задней полярности у эмбриона дрозофилы ключевую роль играет белок bicoid: там, где его больше всего, формируется голова. Однако у многих других насекомых ген *bicoid* не обнаружен, а генетические основы формирования передне-задней оси тела неясны. Как выяснилось, в развитии водных личинок комара-звонца *Chironomus riparius* местоположение головы определяется другим геном, — *panish*, механизм действия которого отличается от *bicoid*. Ранее было показано, что если облучить переднюю часть эмбриона комара-звонца ультрафиолетом, то вместо головы у него развивается второй хвост. Это, по-видимому, означает, что для нормального развития головы необходимы какие-то материнские транскрипты (мРНК, считанные с генов матери): ультрафиолет разрушает их, а запас уже не пополняется. Вероятно, концентрация этих мРНК повышена в той половине яйца, из которой в норме развивается передняя часть насекомого. Чтобы обнаружить эти транскрипты, авторы разрезали пополам ранние эмбрионы комаров (на стадии, когда гены самого эмбриона еще не включились и белки синтезируются на основе материнских транскриптов), а затем выделяли РНК по отдельности из передней и задней половинок. Среди 6604 выявленных транскриптов нашелся только один, которого в передней половине эмбриона бы-

ло намного больше, чем в задней. Этот транскрипт кодирует белок длиной в 131 аминокислоту. Один из его участков (cysteine-clamp domain) получил название Panish. Судя по аминокислотной последовательности, Panish работает в ядре и, скорее всего, является регулятором транскрипции. Ген *panish* мог появиться путем дупликации фрагмента *pangolin* последующими модификациями. Авторы нашли *panish* в геномах двух других видов комаров-звонцов, но за пределами семейства Chironomidae этот ген, по-видимому, не встречается. Чтобы проверить, участвует ли *panish* в формировании передне-задней полярности, исследователи подавляли его активность при помощи РНК-интерференции, вводя в ранние эмбрионы комаров искусственные двухцепочечные РНК с последовательностью нуклеотидов, совпадающей с тем или иным участком *panish*. Это привело к развитию двухвостых, безголовых зародышей. Дополнительные эксперименты подтвердили, что *panish* необходим для формирования передне-задней полярности и головы у комара. Выяснилось также, что действие *panish* отличается от действия *bicoid*. Если ввести в заднюю часть зародыша дрозофилы мРНК *bicoid*, получается бесхвостая личинка с двумя головами. Если же ввести в заднюю часть зародыша комара-звонца мРНК *panish*, вторая голова не вырастает, и развитие идет в целом нормально. Таким образом, системы генной регуляции, управляющие формированием передне-задней оси тела, у дрозофилы и комара-звонца оказались разными. Открытие показало, что системы генетической регуляции важнейших морфогенетических процессов, таких как формирование осей тела, более пластичны, чем считалось. Они неоднократно менялись в ходе эволюции, хотя сами процессы, регулируемые ими, при этом неизменно сохранялись.

В.В. Стрекопытов

Митосомы *Entamoeba* играют важную роль в процессе инцистирования за счет ассоциации с синтезом сульфата холестерина

Entamoeba mitosomes play an important role in encystation by association with cholesteryl sulfate synthesis. Fumika Mi-ichi, Tomofumi Miyamoto, Shouko Takao, Ghulam Jeelani, Tetsuo Hashimoto, Hiromitsu Hara, Tomoyoshi Nozaki, Hiroki Yoshida. PNAS. 2015. E2884–E2890.

Эволюция и диверсификация органелл — одна из важнейших тем современной биологии. Органеллы, связанные с митохондриями (MRO), такие как гидрогеносомы и митосомы, представляют собой высоко модифицированные формы митохондрий, обнаруженные у многих анаэробных и микроаэрофильных эукариотов. В ходе эволюции MRO подверглись множественным независимым вторичным потерям функций митохондрий, что, в конечном счете, привело к широкому филогенетическому распространению организмов, обладающих MRO. Помимо этого, MRO способны приобретать функции других организмов посредством горизонтального переноса

генов (ГПГ). Выявление функций MRO позволит улучшить понимание эволюции органелл и видообразования эукариот. Существование и биологические функции митосом *Entamoeba histolytica* — микроаэрофильного, паразитарного вида амебозоев, вызывающего кишечный и внекишечный амебиаз у людей, представляют собой многолетнюю загадку процесса эволюции митохондрий. Ранее, авторами было установлено, что важнейшей функцией митосом *E. histolytica* является активация сульфата. В данном исследовании авторы очистили и определили сульфат холестерина (CX) в качестве конечного метаболита процесса активации сульфата. Также был идентифицирован ген, который кодирует сульфотрансферазу холестерина, ответственную за синтез CX. Эти результаты показывают, что CX играет важную роль в дифференциации — процессе, ответственном за передачу *E. histolytica* между хозяевами. В рамках проведенного исследования авторы демонстрируют, что *Mastigamoeba balamuthi* — близкий родственник *E. histolytica*, хоть и обладает путем активации сульфата в MRO, не способен к продукции CX. Следовательно, уникальная функция MRO в *E. histolytica* способствует его адаптации к паразитическому жизненному циклу.

Д.Р. Низин

Геномные признаки эволюционных переходов от одиночного к групповому проживанию

Genomic signatures of evolutionary transitions from solitary to group living. Karen M. Kapheim, Hailin Pan, Cai Li, et al. Science. 2015. Vol. 348. No 6239. P. 1139–1143.

Появление эусоциальности является одним из важнейших этапов в эволюционной истории живых существ, однако геномные признаки этого перехода до сих пор не выявлены. Сравнительный анализ геномов 10 видов одиночных и общественных пчел показал, что поэтапное развитие эусоциальности, происходившее параллельно в нескольких эволюционных линиях, было основано на изменении разных наборов генов. 5 геномов были отсекарованы ранее, 5 других прочтены авторами специально для данного исследования. Виды были подобраны таким образом, чтобы эволюционное дерево, отражающее их родственные связи, включало несколько независимых событий приобретения и усовершенствования эусоциальности, а именно, — 2 независимых перехода от одиночной жизни к примитивным формам эусоциальности (просто организованные семьи с небольшим числом рабочих) и 2 перехода от простой эусоциальности к сложной (с огромными семьями и четким разделением труда между рабочими). Предполагается, что переход к эусоциальности должен сопровождаться усложнением генной регуляции. Дело в том, что у социальных насекомых один и тот же геном должен обеспечивать формирование разных фенотипов (каст) в зависимости от условий (сигналов, получаемых в процессе развития), а также сложные системы социальных взаимодействий, коммуникацию и обучаемость. Чтобы проверить эту гипотезу, авторы приняли целенаправленный поиск регуляторных участков генома

(сайтов связывания транскрипционных факторов), к которым прикрепляются белки, регулирующие экспрессию генов (транскрипционные факторы, ТФ). Для этого в промоторных участках генов искали участки ДНК с характерными последовательностями нуклеотидов, к которым прикрепляется тот или иной ТФ. Учитывали 188 ТФ, которые имеются у всех рассматриваемых видов пчел и для которых точно известны нуклеотидные последовательности сайтов связывания. Выяснилось, что по мере развития социальности число таких регуляторных участков действительно росло. Иными словами, у социальных видов на каждый регуляторный белок приходится в среднем больше регулируемых генов, чем у одиночных, а у видов со сложно организованными семьями — больше, чем у видов с простыми формами социальности. Еще один довод в пользу усложнения генной регуляции у социальных видов авторы получили, оценив характер метилирования ДНК, которое, наряду с ТФ, является важным способом регуляции работы генов. Надежность такой оценки уровня метилирования проверялась на медоносной пчеле *Apis mellifera*, у которой метилирование многих генов было изменено напрямую. В итоге выяснилось, что по мере развития эусоциальности уровень метилирования генома действительно увеличился. В отличие от регуляторных участков, белок-кодирующие участки многих ключевых генов, управляющих развитием нервной и эндокринной систем, с переходом к эусоциальности стали эволюционировать медленнее. Скорее всего, это объясняется возросшей многофункциональностью этих генов. Общая направленность генетических изменений при переходе к эусоциальности говорит о расширении нормы реакции генома, то есть о его способности генерировать разные фенотипы в зависимости от получаемых сигналов, в том числе социальных.

V.B. Стрекопытов

Индукцированная гибель клеток и фагоцитоз регулируют пул стволовых клеток волосяного фолликула

Niche-induced cell death and epithelial phagocytosis regulate hair follicle stem cell pool. Kailin R. Mesa, Panteleimon Rempoulas, Giovanni Zito, Peggy Myung, Thomas Y. Sun, Samara Brown, David G. Gonzalez, Krastan B. Blagoev, Ann M. Haberman, Valentina Greco. Nature. 2015. Vol. 522. No 7554. P. 94–97.

Отмирание тканей в волосяном фолликуле опосредовано апоптозом. Однако неясно, какие клетки погибают и результатом чего является этот процесс: внутреннего истощения клеток или давления внешних факторов. Для визуализации клеток мышей во время отмирания волосяного фолликула авторы использовали метод прижизненной микроскопии. С его помощью была зафиксирована гибель клеток в базальном эпителиальном слое. Кроме того, обнаружено, что следы апоптоза присутствовали также в соседних участках. Предполагается, что базальные эпителиальные клетки могут действовать как фагоциты, удаляя остатки во время отмирания волосяного фолликула. Чтобы проверить этот факт, в базальном слое была индуцирована мозаичная экспрессия гена под названием *tdTomato*. Мыши с этим геном светятся красным светом под флюоресцентной лампой. Показано, что клетки базального слоя эпителия от роста до отмирания ведут себя по-разному. Во время роста клетки усиленно делятся митозом. Но в период отмирания эти расположенные в фолликулах клетки, вероятно, должны быть удалены, предполагая модель, в которой истощающий митоз подвергает клетки смерти. Однако, наблюдается картина выживания базальных клеток, вызывая вопрос: является ли это результатом регулируемой индукции клеточной смерти. Количественный анализ покadroвых записей различных стадий отмирания пока-

зал первоначальную локализацию индукции клеточной смерти в нижней части фолликула, находящейся в непосредственном контакте с нишей волосяных соединительнотканых сосочков. Таким образом, сделано предположение, что взаимодействие с сосочками способствует гибели клеток базального слоя эпителия волосяного фолликула. Чтобы изучить процессы на молекулярном уровне, был исследован сигнальный путь трансформирующего фактора роста бета (TGF-β), так как экзогенное введение лиганда TGF-β1 вызывает преждевременное отмирание волосяного фолликула. Обнаружено, что лиганды TGF-β экспрессируются сосочками, в то время как TGF-β-сигналинг активен в базальном эпителии в период отмирания. Для проверки функциональной роли TGF-β-сигналинга в гибели клеток базального эпителия, был удален TGF-β рецептор 1 (TGF-βR1). В работе также поднимается вопрос о том, способствует ли отмирание волосяного фолликула удалению базальных и функциональных клеток из стволового пула. Для решения этого вопроса на период отмирания были удалены волосные сосочки. Поразительно: в то время как соседние фолликулы начали новый цикл роста, фолликулы, способные к образованию сосочков, которым не удалось завершить процесс отмирания, инициировали рост волос из нижней части базального эпителия. Таким образом, показано, что физиологическое отмирание — внешне регулируемый процесс, который уменьшает размер пула стволовых клеток волосяного фолликула, но не затрагивает при этом программы дифференцировки. Отмирание регулируется через TGF-β-сигналинг, инициируемый нишей фолликула, вызывающей пространственно ограниченную смерть клеток базального эпителия. Клиренс апоптотических клеток является процессом, который управляется эпителиоцитами с выраженным фагоцитозом в пределах отмирающего базального слоя.

H.B. Карпов

Исследование потенциального воздействия расширенного генетического кода на функции белков

Exploring the potential impact of an expanded genetic code on protein function. Han Xiao, Fariborz Nasertorabi, Sei-hyun Choi, Gye Won Han, Sean A. Reed, Raymond C. Stevens, Peter G. Schultz. PNAS. 2015. Vol. 112. No22. P. 6961–6966.

Все известные живые организмы при выполнении их функций используют одни и те же 20 канонических аминокислот. Исключение составляют редкие аминокислоты пирролизин и селеноцистеин. В ходе эволюции живых организмов возникли дополнительные регуляторные, каталитические и структурные элементы, которые включают в себя органические и неорганические кофакторы и посттрансляционные модификации, которые значительно расширяют структурный и функциональный набор белковых последовательностей. В этой связи возникает вопрос о том, каким образом генетический код практически в ходе эволюции не изменился. Предполагается, что для добавления дополнительных строительных блоков в генетический код требуется относительно малое число генов. Все, что необходимо заключается в дополнительной соответствующей паре тРНК/аминоацил–тРНКсинтетаза, которая ортогональна относительно существующих пар в организме хозяина (т.е. не будет вступать в перекрестную реакцию с эндогенными парами тРНК/аминоацил–тРНКсинтетаза), избирательно распознает неканоническую аминокислоту и уникальным образом встраивает эту аминокислоту в растущую полипептидную цепь в ответ на нонсенс-кодон или кодон сдвига рамки считывания. Ранее авторы настоящей работы показали, что пирролизин генетически кодируется ортогональной супрессорной янтарной

супрессорной парой тРНК/аминоацил–тРНКсинтетаза и большое количество неканонических аминокислот с уникальными физико-химическими свойствами могут быть добавлены в генетический код прокариотических организмов с незначительным влиянием на скорости роста организмов в нормальных лабораторных условиях. В настоящей работе авторы получили большую библиотеку мутантных форм ферментов, в которых 10 структурно различающихся неканонических аминокислот были введены случайным образом в TEM-1 β-лактамазу. Испытания проводились в среде, содержащей β-лактамы антибиотик цефалексин. Было показано, что уникальная замена аминокислотного остатка Val-216 на AcrF (p-acrylamido-phenylalanine) приводит к повышению каталитической эффективности фермента. Для выявления структурной основы повышения активности фермента авторы получили кристаллические структуры свободной от лиганда формы фермента, фермента, дефектного по деацелированию фермента дикого типа и промежуточного состояния мутантной формы фермента и цефалоксина. На полученных структурах было показано, что замена остатка валина 216 на AcrF вызывает конформационные изменения в ключевых аминокислотных остатках активного центра фермента, как в свободном ферменте, так и при образовании его ацильного производного. Аминокислотная замена приводит к понижению значения энергии активации реакции трансацилирования субстрата. Также было показано, что изменения функции, вызванные этой заменой, не могут быть воспроизведены путем замены остатка валина 216 на любую из 20 канонических аминокислот. На основании полученных результатов авторы пришли к заключению, что расширение генетического кода может способствовать получению белков с новыми функциями.

И.М. Мохосоев

Удаление и восстановление кэп-структуры в информационной РНК у трипаносом

The messenger RNA decapping and recapping pathway in Trypanosoma. Anna V. Ignatichkina, Yuko Takagi, Yancheng Liu, Kyosuke Nagata, C. Kiong Ho. PNAS. 2015. Vol. 112. No22. P. 6967–6972.

Ранняя модификация эукариотической мРНК заключается в добавлении кэп-структуры (m⁷GpppN; кэп0) к 5'-концу. Функция кэпа заключается в защите мРНК от деградации экзонуклеазами и рекрутировании факторов, которые способствуют осуществлению сплайсинга молекулы мРНК, ее экспорту из ядра и инициации трансляции. Образование кэпа в ядре происходит в результате трех последовательных ферментативных реакций: 5' трифосфат растущей мРНК подвергается гидролизу РНКтрифосфатазой с образованием дифосфата; конец дифосфата под действием РНКгуанилтрансферазы подвергается кэпированию с помощью ГМФ; образовавшийся GpppPНК подвергается метилированию (N⁷-атом гуанина) с помощью метилтрансферазы с образованием структуры кэп0. Обычно нуклеотиды, расположенные поблизости от кэпа, также подвергаются метилированию по первому или второму нуклеозиду с образованием кэп1 и кэп2, соответственно. В клетках *Trypanosoma brucei* и других кинетопластидных паразитов обнаружена структура кэп4, которая содержит кэп0 и метилированные группы 2'-О в первых четырех моносахаридах рибозы (AmAmCmUm), а также дополнительные метилированные основания, такие как первый аденин (m₆,6A) и четвертый урацил (m₃U). Было показано, что в клетках *Trypanosoma brucei* фермент TbCgm1, обладающий как гуанилтрансферазой, так и ме-

тилтрансферазой активностью, модифицирует 5'-дифосфатный конец РНК с образованием кэп4. В то же время, несмотря на то, что было показано, что дополнительные метильные группы могут повышать эффективность трансляции, тем не менее неясно их влияние на процесс деградации РНК в клетке. В настоящей работе авторы показали, что кэпирующий цитоплазматический фермент *T. brucei* (TbCe1) представляет собой бифункциональную 5'-РНК киназу и гуанилтрансферазу, который переносит γ-фосфатную группу от АТФ на фРНК (pRNA) с образованием фФРНК (ppRNA), которая затем кэпируется в результате переноса ГМФ от ГТФ на β-фосфат РНК. Показано, что А-бокс Уолкера в N-концевом домене необходим для проявления РНК-киназной активности и он направлен преимущественно на последовательность с 5'-концевым метилированным нуклеозидом в подвергшейся сплайсингу РНК. Также было показано, что сайленсинг TbCe1 приводит к накоплению некэпированных мРНК. Авторы идентифицировали в *T. brucei* декэпирующий мРНК фермент (TbDcp2), который отщепляет m⁷ГДФ от кэпированной молекулы РНК с образованием фРНК, которая является субстратом для TbCe1. TbDcp2 также был способен удалять ГДФ из неметилированной кэпированной РНК, однако, он был менее активен в отношении конца зрелого сар4. На этом основании авторы высказали предположение, что этот фермент может участвовать в осуществлении надзора за качеством кэп-структуры мРНК. Полученные авторами результаты свидетельствуют в пользу того, что гиперметилированная структура кэпа может оказывать влияние на процесс предпочтительного декэпирования или кэпирования определенных транскриптов во время жизненного цикла паразита.

И.М. Мохосоев

Белок UCP1 связывает один нуклеотид на мономер и его стабилизация обусловлена прочно связанным кардиолипином

Uncoupling protein 1 binds one nucleotide per monomer and is stabilized by tightly bound cardiolipin. Yang Lee, Chrissie Willers, Edmund R. S. Kunji, Paul G. Crichton. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. P. 6973–6978.

В бурой жировой ткани происходит окисление жирных кислот, сопровождающееся выделением тепла в условиях холода. Эта ткань присутствует у взрослых людей и обеспечивает возможности взрослого организма противостоять ожирению. Выделение тепла бурой жировой тканью находится в строгой зависимости от активности разобщающего белка UCP1 – белка-переносчика (33 кДа), расположенного в митохондриальной мембране. Этот белок катализирует активированный жирными кислотами и чувствительный к пуриновым нуклеотидам перенос протонов через внутреннюю мембрану митохондрий в бурой жировой ткани. В результате переноса протонов происходит разобщение процессов транспорта электронов и синтеза АТФ, что приводит к высвобождению энергии протондвижущей силы в виде тепла. Предполагается, что этот белок помогает человеческому организму противостоять не только ожирению, но и метаболической болезни. Во время адренергической стимуляции бурых адипоцитов (например, при нахождении на холоде) происходит высвобождение длинноцепочечных жирных кислот из липидных капель, которые вызывают активацию белка UCP1, до этого ингибированного пуриновыми нуклеотидами, присутствующими в цитозоле. В результате происходит индукция процесса термогенеза. На протяжении многих лет существовало общее мнение насчет структуры

этого белка. Было принято считать, что UCP1 существует в виде димера, так как было показано, что один нуклеотид связывается с двумя белками. В то же время, было показано, что UCP1, в отличие от других белков-переносчиков, функционирует независимо от митохондриального липида-кардиолипина, который усиливает активность многих переносчиков и обнаруживается связанным с АДФ/АТФ переносчиком в различных доступных кристаллических структурах. Однако недавно в нескольких работах было показано, что митохондриальный АДФ/АТФ переносчик является скорее мономером, чем димером, что привело к появлению вопроса об олигомерном состоянии белка UCP1. В настоящей работе авторы разработали ряд новых методов для очистки миллиграммовых количеств белка UCP1 из природных источников с использованием ковалентной хроматографии, которая позволила им получать белок в состоянии, свободном от детергента и липидов. С помощью тонкослойной хроматографии было показано, что белок UCP1, подобно другим АДФ/АТФ переносчикам, содержит прочно связанный кардиолипин в соотношении три молекулы липида на одну молекулу белка. Было показано, что кардиолипин вызывает стабилизацию белка UCP1, что свидетельствует в пользу важной роли липидов в функционировании мембраносвязанных белков. Более того, авторы получили данные о том, что белок UCP1 представляет собой мономер, так как происходит связывание одного нуклеотида на мономер белка. На основании полученных результатов авторы пришли к заключению, что UCP1 не отличается от других митохондриальных белков-переносчиков и, по-видимому, использует обычный механизм обмена нуклеотидов в процесс его функционирования в митохондриях бурой жировой ткани.

И.М. Мохосеев

Структурные перестройки в фаговом интерфейсе «головка–хвост» во время сборки и заражения

Structural rearrangements in the phage head-to-tail interface during assembly and infection. Yuriy Chaban, Rudi Lurz, Sandrine Brasiles, Charlene Cornilleau, Matthia Karreman, Sophie Zinn-Justin, Paulo Tavares, Elena V. Orlova. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. P. 7009–7014.

Вирусы бактерий (бактериофаги или фаги) и вирусы герпеса содержат генетическую информацию, упакованную в икосаэдрический белковый капсид. Во время сборки вирусных частиц геном перемещается в предварительно построенный прокапсид через специальный портал на его вершине. Пример вирусов с портальной системой – хвостатый бактериофаг *SPP1 Bacillus subtilis*. Его вирусная частица состоит из изометрического икосаэдрического капсида размером около 60 нм в диаметре, защищающего вирусную хромосому длиной 49,5 тыс. пар оснований. Сообщается, что посредством криоэлектронной микроскопии (cryoEM) и анализа отдельных частиц у SPP1 получены субнанометровые структуры (коннектор, стоппер и др.) так называемого интерфейса «головка–хвост» (НТИ) до и после высвобождения ДНК. Эти микроскопические структуры были использованы для объединения рентгеновского излучения и атомных ЯМР-моделей белковых компонентов НТИ, делая возможным выявление схем белок-белковых и белок-ДНК взаимодействий в полной НТИ. Структурные исследования НТИ в целых SPP1-частицах до и после высвобождения ДНК являются трудными. Одна из причин заключается в том, что часть коннектора встроена в капсид, который скрывает структурные детали. Подробные псевдоатомные модели НТИFull и НТИEmpty

структур были созданы аппроксимацией атомных структур белков SPP1 (gp6, gp15, gp16 и gp17) в карты, полученные методом cryoEM. Для определения начала спиральной хвостовой трубки при реконструкциях использовалась модель основного хвостового белка gp17.1. В состоянии высвобождения ДНК (модель НТИFull) центральный канал НТИ заполнен. ДНК заключена в порталном белке gp6 в основном за счет тесных контактов с порталными туннельными петлями. Выход ДНК связан с перестановками в порталном канале. Сборка ЯМР-структуры мономера gp15 на электронно-микроскопических картах НТИFull и НТИEmpty показывает, что спирали $\alpha 0$ и $\alpha 1$ образуют внешнюю поверхность в комплексе «головка–хвост», а спирали $\alpha 2$ и $\alpha 3$ повернуты, чтобы занять позицию параллельно центральному каналу. Во время сборки вируса эта перестройка gp15 не является существенной. Двойную роль играет белок gp16: как ДНК-фильтр для портальной системы капсида и как связующее звено для хвоста во время сборки вируса. Связывание хвоста, суженного белком gp17, вызывает изменения в положении петель $\beta 1$ / $\beta 2$ из gp16, которые спускаются на периферию молекулы. Стоппер gp16 закрыт в обоих состояниях (как НТИFull, так и НТИEmpty). Хотя НТИEmpty состояние вызвано взаимодействием специального рецептора с кончиком хвоста, нельзя заключить, что стоппер открывается и закрывается во время этого процесса, так как ДНК может выйти через коннектор. Таким образом, результаты показывают, что сборка НТИ и высвобождение ДНК из вириона SPP1 осуществляется через тонкие структурные перестройки в белках НТИ. Ключевым звеном является gp16, который образует пробку путем аллостерического механизма, чтобы сохранить вирусный геном, и открывает ее для выброса ДНК во время заражения.

Н.В. Карпов

Клеточное омоложение и социальное поведение, вызываемое обменом липополисахаридов (ЛПС) в миксобактериях

Cell rejuvenation and social behaviors promoted by LPS exchange in myxobacteria. Christopher Vassallo, Darshankumar T. Pathak, Pengbo Cao, David M. Zuckerman, Egbert Hoiczky, Daniel Wall. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. E2939–2946.

Как клетки справляются с повреждениями – один из фундаментальных вопросов современной биологии. В зависимости от среды обитания, микроорганизмы могут быть подвержены различным видам повреждений – физическим, биологическим или химическим. Ультрафиолетовое излучение, усыхание, внеклеточные ферменты, антимикробные соединения, хищничество, а также изменения температуры, водородного показателя и осмоларности – все это оказывает непосредственное влияние на отдельную клетку. Кроме того, в некоторых элементах поверхности клеток, не способных к активному восстановлению, может осуществляться накопление повреждений за счет естественных процессов старения, таких как денатурация белка и окисление.

Хотя внутренние пути реакции клеток на стресс хорошо известны, механизмы борьбы с повреждениями клеточной поверхности в социальном и многоклеточном контексте практически не изучены. Для решения данной задачи авторы исследовали модель социального поведения бактерий *Mycobacterium xanthus* в процессе обмена материалом наружной мембраны (ОМЕ). При этом осуществляется восстановление наружной мембраны одних членов популяции за счет представителей родственной популяции. Установлено, что такое поведение позволяет клеткам избавиться от смертельных повреждений, восстановить устойчивость ослабленной клеточной мембраны к антибиотикам и увеличить общую приспособленность гетерогенной популяции. В частности, клетки, дефектные по ЛПС, были спасены посредством ОМЕ со здоровыми донорскими клетками. Выявлено, что для этого необходимы TraA – гомофильные рецепторы клеточной поверхности, которые идентифицируют родственные организмы на основании сходства полиморфных областей, а также белки группы TraB. По мнению авторов, миксобактерии используют механизм ОМЕ не только для избавления от повреждений клеток, но и для перехода к многоклеточному организму.

Д.Р. Низин

Лимфатические сосуды возникают из специализированных ангиобластов внутри венозной ниши

Lymphatic vessels arise from specialized angioblasts within a venous niche. J. Nicenboim, G. Malkinson, T. Lupo, et al. Nature. 2015. Vol. 522. No 7554. P. 56–61.

Одним из фундаментальных вопросов биологии развития и регенеративной биологии является вопрос о том, какие механизмы определяют функциональное назначение клеток. Мультипотентные недифференцированные клетки-предшественники начинают реализовываться, получив из микроокружения определенные сигналы, природа которых пока не известна. Что касается возникновения лимфатической системы, то здесь традиционно считалось, что лимфатические сосуды образуются из клеток сердечной вены в процессе транс-дифференциации. Сторонники альтернативной гипоте-

зы полагали, что исходным материалом для этой системы служат ангиобласты – специализированные стволовые клетки, из которых формируются кровеносные сосуды эмбриона. Согласно результатам исследования, оба предположения являются правильными. Авторы изучили *in vivo* процесс образования лимфатической системы у рыбок данио-рерио (*Danio rerio*). Оказалось, что клетки лимфатической системы формируются из уже существующих вен, в которых представлены скопления ангиобластов. При этом клетки, которые дают начало лимфатическим сосудам, всегда возникают в одной и той же части основных вен эмбриона (венозная ниша). Авторы исследования также выяснили, что экспрессия гена *Wnt5b* запускает процесс дифференцировки стволовых клеток в лимфатические. Эти данные помогли впервые вырастить клетки лимфатических сосудов в лабораторных условиях. Ученые считают, что их исследование позволит уточнить причины возникновения заболеваний, связанных с нарушением работы лимфатической системы.

В.В. Стрекопытов

Идентификация персонального микробиома с помощью метагеномных кодов

Identifying personal microbiomes using metagenomic codes. Eric A. Franzosa, Katherine Huang, James F. Meadow, Dirk Gevers, Katherine P. Lemon, Brendan J. M. Bohannan, Curtis Huttenhower. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. E2930–E2938.

Число бактерий, обитающих в организме, примерно в 10 раз превышает число клеток человека. Недавние исследования сообщества микроорганизмов, обитающих на поверхности и внутри человеческого тела, выявили отчетливо проявленную индивидуализацию персонального микробиома. Причем эта индивидуализация настолько устойчива с течением времени, что позволяет говорить об уникальном «микробном отпечатке пальцев» или «биологическом паспорте», по которому можно с большой долей вероятности идентифицировать любого человека. Авторы исследования в течение месяца исследовали биологические образцы 242 добровольцев. Для каждого из них были получены так называемые

метагеномные коды – последовательности генома бактерий, которые чаще всего встречались в организме участников эксперимента. Затем авторы сравнили коды с последовательностями, позже выделенными из биологических образцов, а также сопоставили информацию с кодами людей, которые не принимали участие в эксперименте. Согласно результатам исследования, метагеномные коды не только являются уникальными для каждого человека, но и остаются стабильными в течение длительного времени. По мнению ученых, меньше всего изменяется кишечная микрофлора, вероятность идентификации индивидуума по которой превышает 80%. Получается, что при определенных обстоятельствах образцы кожи, слюны или кала могут помочь установить личность человека без использования какой-либо дополнительной информации. На протяжении последних десятилетий область судебной генетики базировалась на сравнении образцов ДНК человека с базой данных ДНК. Теперь же по аналогичному принципу может быть проведено сравнение между ДНК микроорганизмов, находящихся в человеческом теле.

В.В. Стрекопытов

Аллостерические свойства белка теплового шока Hsp70 обусловлены конформационной динамикой субстрат-связывающего домена

Substrate-binding domain conformational dynamics mediate Hsp70 allostery. Anastasia Zhuravleva, Lila M. Gierasch. PNAS. 2015. Vol.112. No 22. E2865–E2873.

Молекулярные шапероны, такие как белок теплового шока 70 (Hsp70), являются основными игроками внутриклеточных систем контроля качества белков практически у всех живых организмов, от бактерий до человека. Их функция заключается в поддержании белкового гомеостаза. Для осуществления функций белков Hsp70 необходим строгий контроль их связывания с огромным количеством самых разнообразных белков и их последующего высвобождения. Все белки Hsp70 содержат два высоко консервативных домена: N-концевой нуклеотид-связывающий домен NBD, регулирующий сродство связывания субстрата, и C-концевой субстрат-связывающий домен SBD, который связывает белки. В свою очередь, домен SBD образован доменом типа «β-сэндвич» (βSBD) и α-спиральной «крышкой» (αLid). Функции Hsp70 основаны на междоменной аллостерии. Так, гидролиз АТФ на домене NBD контролирует термодинамику и кинетику связывания субстрата и его высвобождение. Напротив, связывание субстрата с доменом SBD приводит к стимуляции АТФазной активности домена NBD. Связывание молекулы АТФ с NBD приводит к снижению сродства домена SBD к развернутым белковым субстратам. В то же время, связывание АТФ с NBD приводит к докингу доменов NBD и фрагмента SBD (βSBD) и открытию α-спиральной «крышки» над субстрат-связывающим карманом в домене SBD. В то же время, по мнению авторов, сами по

себе эти структурные изменения не представляют полный аллостерический механизм модуляции сродства к субстрату и кинетику его связывания. В настоящей работе авторы помощью методов ядерно-магнитного резонанса в растворе и компьютерного моделирования изучили роль конформационной гибкости βSBD белка теплового шока Hsp70 из *Escherichia coli* (Hsp70 DnaK) в осуществлении аллостерического сигналинга в этом шапероновом белке. Ими в структуре βSBD были идентифицированы две критические «горячие точки»: одна из находится в петлях L34 и L56, окружающих субстрат-связывающий центр, в то время как вторая расположена внутри гидрофобного ядра, образованного β-складчатыми цепями β5, β7 и β8, локализованными вблизи междоменного интерфейса. Было показано, что основную роль в междоменном аллостерическом взаимодействии играют изменения конформационной динамики внутри домена βSBD. В частности, показано, что связывание АТФ с доменом NBD способствует образованию контактов между этим доменом и определенными участками в βSBD, что приводит к перестройке гидрофобного кластера в βSBD и разрушению гидрофобной арки над субстрат-связывающим карманом. В свою очередь, эти структурные перестановки резко усиливают конформационную гибкость всего домена βSBD и, в особенности, его участка, окружающего субстрат-связывающий центр. По мнению авторов, эта отрицательная, движимая энтропией аллостерия между двумя функциональными сайтами βSBD, а именно, NBD-связывающим интерфейсом и субстрат-связывающим центром, обеспечивает известную пластичность SBD, крайне необходимую для взаимодействия Hsp70 с самыми различными белковыми субстратами («клиентами шаперонов»). При этом обеспечивается сохранение строго контроля термодинамики и кинетики этого взаимодействия.

И.М. Мохосоев

Древние белки помогают восстановить эволюционную историю южноамериканских копытных Дарвина

Ancient proteins resolve the evolutionary history of Darwin's South American ungulates. Frido Welker, Matthew J. Collins, Jessica A. Thomas, et al. Nature. 2015. Vol. 522. No 7554. P. 81–84.

Происхождение двух причудливых ископаемых животных, которые были описаны Чарльзом Дарвином во время своего южноамериканского путешествия на корабле «Бигль» как принадлежащие «самым странным животным из когда-либо открытых», оставалось неясным на протяжении 180 лет. Одно из них, напоминающее гигантскую лошадь или верблюда с длинной шеей как у жирафа, к тому же имеющее хобот, Дарвин назвал макраухенией (*Macrauchenia*, Litopterna), другое – носорога с головой бегемота и зубами грызуна – токсодоном (*Toxodon*, Notoungulata). Останки токсодона он выкупил у уругвайского фермера за несколько шиллингов, а макраухению нашел сам по морде, выступающей из песка на побережье в южной Патагонии. Дарвин оказался не в состоянии классифицировать странных млекопитающих, так как они были похожи «на всех животных сразу». Чтобы как-то справиться с задачей классификации, их включили в условную группу южноамериканских копытных, куда относятся еще около 280 видов. Про эту группу неизвестно практически ничего: зародилась ли она до или после мел-палеогенового перехода, имевшего место 66,2 млн лет назад, и можно ли ее представителей относить к надпорядку *Afrotheria*, в который входит множество видов от слонов до дельфинов, включая непарнокопытных. На сегодняшний день в различных естественнонаучных музеях мира хранятся 48

окаменелостей, принадлежащих этой загадочной группе. Международным коллективом авторов-разработчиков нового метода изучения эволюционной истории ископаемых животных на основе анализа коллагенов провел исследование этих останков. Как установили авторы, оба вида происходят из древнего отряда кондилартров (*Condylarthra*) – парафилетической группы древних южноамериканских плацентарных, родственных непарнокопытным. Для выяснения загадочного происхождения макраухений и токсодонов, вымерших около 10-12 тыс. лет тому назад, исследователи изучили коллагены, которые, в отличие от ДНК, сохранились в ископаемых костях. Последовательность белка удалось установить лишь у 5 представителей «странных дарвиновских животных» из 45, служивших объектами исследования. Тем не менее, для каждого вида были получены 90%-ные последовательности цепей α1 и α2 коллагена I типа. Эти последовательности сравнили с коллагеном ряда ныне живущих млекопитающих и нескольких вымерших. При сопоставлении выяснилось, что оба ископаемых гиганта составляют сестринскую группу с непарнокопытными, что дало возможность разместить их на эволюционном дереве. Дарвин предполагал, что найденные и описанные им гиганты имеют отношение к таким разным животным как слоны, ламантины (морские коровы), трубкузубые (муравьеды) и грызуны. Методы молекулярной биологии помогли восстановить эволюционную историю «дарвиновских» копытных, поместив их ближе к непарнокопытным, то есть к лошадям, тапирам и носорогам. Классифицировать ископаемых животных более точно теоретически возможно, расширив круг анализируемых белков костной ткани, но база данных для сравнительного анализа в настоящее время существует только для коллагена.

В.В. Стрекопытов

Определение структур белков на основе полудостоверных данных и атомистических физических моделей на основе байесовского вывода

Determining protein structures by combining semireliable data with atomistic physical models by Bayesian inference. Justin L. MacCallum, Alberto Perez, Ken A. Dill. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. P. 6985–6990.

На настоящий момент известно более 100 тысяч атомистических белковых структур. Однако, значительно больше структур до сих пор неизвестно. В особенности, это касается больших по размеру или сложных белков. Часто информация, полученная в экспериментах, является полудостоверной, так как она является неопределенной, ограниченной или противоречивой по многим параметрам. В некоторых экспериментах исследователи получают редкие, двусмысленные или неопределенные результаты, где нельзя уверенно утверждать что правильно, а что нет. В настоящей работе авторы

применяли такой метод интегративной структурной биологии, как моделирование с использованием ограниченных данных (MELD), который использует такую полудостоверную информацию для усовершенствованного подхода к определению белковой структуры. В этом методе используются значения свободной энергии для осуществления выбора между различными возможными интерпретациями имеющихся данных и проведения тщательной, надежной статистической обработки для разрешения вопросов двусмысленности, неопределенности и редкости этих данных. Авторы применили метод MELD для определения структуры восьми различных белков, для которых имеется такие проблемные структурные данные, включая набор редких данных, полученных методом ЯМР, два набора двусмысленных данных и четыре набора неопределенных данных, полученных из исследований эволюции последовательностей. С помощью MELD авторами были получены отличные структуры, что свидетельствует о большом потенциале этого метода для экспериментального определения структуры биомолекул в тех случаях, когда имеются только полудостоверные данные.

И.М. Мохосоев

Центр импринтинга синдрома Ангельмана кодирует промоторы транскрипции

Angelman syndrome imprinting center encodes a transcriptional promoter. Michael W. Lewis, Jason O. Brant, Joseph M. Kramer, James I. Moss, Thomas P. Yang, Peter J. Hansen, R. Stan Williams, James L. Resnick. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. P. 6871–6875.

Принято считать, что в результате процесса генетического импринтинга достигается селективное молчание аллельных генов одного из родителей. Как правило, импринтированные гены объединяются в кластеры, включающие центр импринтинга (ЦИ), который регулирует аллель-специфическую экспрессию генов, а также сброс идентичности родительских аллелей между поколениями. Участок хромосомы 15q11–15q13 представляет интерес для исследователей не только потому, что в нем содержатся и отцовские, и материнские импринтированные гены, но и так как он лежит в основе двух клинически различных нервных расстройств – синдрома Ангельмана (AS) и синдрома Прадера-Вилли (PWS). AS связан с делецией участка 15q11–15q13 материнской хромосомы,

а PWS – с делецией того же участка отцовской хромосомы. Общие для этих делеций последовательности ДНК определяют двусторонний характер центра импринтинга локуса AS–PWS. Элемент центра импринтинга, представляющий собой наименьшую область перекрытия делеций (SRO) в случае PWS, активирует экспрессию генов отцовской аллели. Аналогичный элемент AS–SRO генерирует идентичность материнской аллели посредством эпигенетической инактивации PWS–SRO в ооцитах, что приводит к молчанию генов отцовской аллели. На основании имеющихся данных, в приведенном исследовании авторы изучили функциональную деятельность элемента AS–SRO, ответственного за идентичности материнской аллели. Установлено, что элементы AS–SRO человека представляют собой ооцит-специфические промоторы, генерирующие транскрипты, которые перемещают элементы PWS–SRO. Подобные промоторы также были выявлены в ооцитах коров. Полученные результаты согласуются с моделью, согласно которой центры импринтинга в ответ на проходящую транскрипцию подвергаются метилированию ДНК и приобретают идентичность материнской аллели.

Д.П. Низин

Эффект приложения механической силы к равновесию между двумя состояниями гиалурунонан-связывающего домена CD44 при роллинге клеток

Mechanical force effect on the two-state equilibrium of the hyaluronan-binding domain of CD44 in cell rolling. Takashi Suzuki, Miho Suzuki, Shinji Ogino, Ryo Umemoto, Noritaka Nishida, Ichio Shimada. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. P. 6991–6996.

Доставка лейкоцитов из кровеносного потока к местам инфекции и воспаления или к специфическим органам достигается в результате каскада последовательных событий адгезии, таких как роллинг (перекатывание), индуцированная хемокинами активация, прочная адгезия и межклеточная миграция. Роллинг клеток обеспечивается специализированными адгезионными молекулами клеточной поверхности, такими как селектины, CD44 (трансмембранный белок-рецептор гиалуруоновой кислоты) и различными типами интегринов. Их взаимодействие вносит вклад в различ-

ные физиологические и патологические процессы, включая трафик Т-лимфоцитов по эндотелию, оседание клеток-предшественников гематопоэза в костном мозге, прогрессию атеросклероза и др. Показано, что гиалурунонан-связывающий домен (HABD) в CD44 может находиться в одном из двух взаимопереходных состояний: низкоаффинном упорядоченном (O) или высокоаффинном частично разупорядоченном (PD) состоянии. Переход домена из одного состояния в другое происходит в результате конформационных изменений в С-концевом участке домена, который связан с плазматической мембраной. В настоящей работе авторы показали, что сила, приложенная к С-концевому участку гиалурунонан-связывающего домена CD44, стабилизирует опосредованный этим рецептором роллинг клеток. Авторами также было показано, что эффект приложенной силы проявляется в сокращении времени перехода рецептора из низкоаффинного в высокоаффинное состояние. Описанный в настоящей работе механизм обеспечивает структурную базу для роллинга клеток с участием CD44, который имеет большое значение для передвижения димфоцитов и заселения стволовых клеток.

И.М. Мохосоев

ATRX допускает переключение модификации гистонового белка H3 methyl/phos для поддержания сайленсинга повторяющихся элементов в нейронах

ATRX tolerates activity-dependent histone H3 methyl/phos switching to maintain repetitive element silencing in neurons. Kyung-Min Noh, Ian Maze, Dan Zhao, Bin Xiang, Wendy Wenderski, Peter W. Lewis, Li Shen, Haitao Lie, C. David Allis. PNAS. 2015. Vol. 112. No22. P. 6820–6827.

Связанный с талассемией белок ATRX (the alpha thalassemia/mental retardation syndrome X-linked protein) является членом семейства SWI2/SNF2 (switch2/sucrose nonfermentable family 2) хроматин-изменяющих белков. Этот белок был выявлен при проведении генетических исследований, когда было показано, что многочисленные мутации кодирующей ATRX последовательности приводят к редкому синдрому задержки умственного развития, характеризующемуся большим набором нарушений нормального развития, альфа-талассемией и нарушением когнитивных способностей. Показано, что белок ATRX состоит из различных консервативных белок-связывающих доменов, определяющих функции этого белка, включая N-концевой глобулярный домен, известный как ADD (ATRX-DNMT3-DNMT3L)-домен. Этот домен также содержит многочисленные суб-домены, в том числе GATA-1-подобный домен и растительный гомеодомен (PHD-plant homeodomain) «цинковый палец». C-концевой участок белка также содержит многочисленные консервативные домены, которые обеспечивают его АТФазную активность. Кроме того, здесь располагаются другие структуры, ассоциированные с белок-белковыми взаимодействиями и внутриядерной локализацией этого белка. Известно, что

этот белок локализован на различных локусах гетерохроматина и его первичной функцией является распознавание так называемых «репрессирующих» модификаций гистоновых белков, таких как, например, триметилированный по остатку лизина 9 гистон H3 (H3K9me3). В большинстве типов клеток ATRX располагается исключительно внутри ядра и преимущественно локализуется на высокоповторяющихся последовательностях гетерохроматина на протяжении всего генома (например, перичентромерные сателлитные последовательности, теломеры, рибосомная ДНК и др.). Недавно некоторые механизмы контроля прикрепления ATRX к гетерохроматиновым локусам были идентифицированы. Так, было показано, что ATRX может нацеливаться на определенные участки хроматина через взаимодействия его GATA-1-подобного домена с ДНК-матрицей. В настоящей работе авторы описали способность этого белка распознавать оказывающие на активность пост-митотических нейронов комбинации различных модификаций гистоновых белков: триметилирование остатка лизина 9 гистона H3 и фосфорилирование остатка серина 10 (H3K9me3S10ph). Авторами показано, что это переключение на «метил/фос» происходит исключительно после периодов стимуляции и часто присутствует на гетерохроматиновых повторах, ассоциированных с центромерами. В ходе выполнения работы авторы обнаружили, что H3K9me³S10ph-связанный Atrx подавляет транскрипцию некодирующих центромерных минорных сателлитных последовательностей во время повышенной активности нейронов. Полученные авторами результаты свидетельствуют в пользу существования в центральной нервной системе взаимосвязи между ATRX и ранее неизвестной модификацией гистонов и предполагают потенциальную роль аномальной транскрипции повторяющихся элементов при патологических состояниях, характеризующихся нарушением функции ATRX.

И.М. Мохосоев

Взаимодействие и сигналинг между космополитными видами фитопланктона и ассоциированными с ним бактериями

Interaction and signalling between a cosmopolitan phytoplankton and associated bacteria. S. A. Amin, L. R. Hmelo, H. M. van Tol, B. P. Durham, L. T. Carlson, K. R. Heal, R. L. Morales, C. T. Berthiaume, M. S. Parker, B. Djunaedi, A. E. Ingalls, M. R. Parsek, M. A. Moran, E. V. Armbrust. Nature. 2015. Vol. 522. No 7554. P. 98–101.

Взаимодействие между первичными производителями и бактериями оказывает непосредственное влияние на их физиологию, изменяя химию окружающей среды и формируя разнообразие экосистем. В наземных системах данное взаимодействие, как правило, осуществляется в ризосфере — участке почвы, прилегающей к корням растений. При этом изучение подобных взаимодействий в морских экосистемах представляет собой достаточно трудоемкий процесс, в связи с тем, что в роли основных фотосинтезирующих организмов здесь выступают микроскопические одноклеточные водоросли — фитопланктон. Основную массу прибрежных сообществ фитопланктона составляют диато-

мовые водоросли, производящие около 40% морской первичной продукции и участвующие во многих морских пищевых сетях. Известно, что диатомеи сосуществуют с определенным бактериальным таксоном, однако механизмы их возможных взаимодействий практически не изучены. Для выявления механизмов, лежащих в основе данных взаимодействий, авторы выделили 49 бактериальных штаммов, связанных с четырьмя изолятами прибрежных диатомовых водорослей *Pseudo-nitzschia multiseriata* Тихого и Атлантического океанов. Было обнаружено, что виды *Sulfitobacter* стимулируют деление клеток диатомеи за счет секреции индол-3-уксусной кислоты (ИУК), синтезируемой бактериями с использованием триптофана, как эндогенного, так и секретированного диатомовыми водорослями. ИУК и триптофан выступают в качестве сигнальных молекул, которые являются частью сложного обмена вещества, включающего выделяемые диатомеями сераорганические молекулы и выделяемый бактериями аммиак. Взаимодействия, описанные в данном исследовании, показывают, как влияние бактерий на физиологию фитопланктона может быть связано с глобальным циклом углерода, образованием цветения воды и функционированием экосистем.

Д.Р. Низин

Геномный импринтинг, действие и взаимодействие геномов матери и плода

Genomic imprinting, action, and interaction of maternal and fetal genomes. Eric B. Keverne. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. 6834–6840.

Геномный импринтинг представляет собой эпигенетический процесс, особенность которого состоит в наследуемости паттерна аутосомной экспрессии генов в соответствии с происхождением данного гена от одного из родителей. У млекопитающих геномный импринтинг эволюционировал с возникновением плаценты. Эпигенетическая метка, регулирующая моноаллельную экспрессию только материнского или отцовского аллеля, наследуется и репрограммируется преимущественно в материнской линии. В настоящее время у млекопитающих идентифицировано около 100 «импринтированных» генов, большинство из которых экспрессируется в плаценте, причем некоторые из этих плацентарных генов экспрессируются также в развивающемся гипоталамусе плода. Функции этих генов связаны с клеточной пролиферацией, арестом клеточного цикла и апоптозом. В эмбриональном периоде гипоталамус и плацента плода развиваются и экспрессируют одинаковые гены одновременно, причем гормоны плаценты влияют на функции гипоталамуса матери. Таким образом, в этом процессе геном плода определяет свою собственную судьбу через влияние плаценты на гипоталамус матери. Это влияние направлено на создание оптимальных условий для развития плода, в котором в это же время формируется собственный гипоталамус. Такое межгенерационное взаимодействие создает основу для оптимального материнства уже в следующем поколении. Успех этого процесса зависит

от геномного импринтинга и направленного действия генов материнской линии. Материнское метилирование генов определяет, гены какого из родителей будут участвовать в фундаментальном развитии плаценты и гипоталамуса. В дальнейшем гены материнской линии определяют трансгенерационное репрограммирование этих импринтов. Развивающиеся ошибки минимизируются благодаря строгому контролю импринтированных генов над регуляцией расширившихся в процессе эволюции семейств генов, важных для развития плаценты и гипоталамуса. Сами импринтированные гены, эволюционировавшие под действием очищающего отбора, обеспечивают основу для стабильности внутриутробного развития организма, так что большинство вариаций в развитии происходит уже постнатально. Поскольку только в организме матерей, но не отцов, должны происходить эндокринные и поведенческие адаптации, необходимые для выхаживания, кормления и защиты детеныша, ко-адаптивное развитие плаценты и гипоталамуса плода вызвало необходимость одновременного обеспечения маскулинизации самца. Только в эволюции плацентарных млекопитающих появился определяющий мужской пол ген *SRY*, который активирует транскрипционный фактор *Sox9*, необходимый для развития семенников. *SRY* представляет собой гибридный ген, образовавшийся из гена *Dgcr8*, экспрессирующегося в развивающейся плаценте, и гена *Sox3*, экспрессирующегося в развивающемся гиппокампе. Эта гибридизация генов, происходящих из плаценты и гипоталамуса, сделала возможной критически важное во внутриутробном периоде развитие у мужского плода клеток Лейдига и производство ими тестостерона, необходимого для маскулинизации гипоталамуса.

А.А. Тиунова



Медицина

Нарушение зависящей от метилирования ДНК репрессии длинных генов при синдроме Ретта

Disruption of DNA-methylation-dependent long gene repression in Rett syndrome. Harrison W. Gabel, Benyam Kinde, Hume Stroud, et. al. Nature. 2015. Vol. 522. No 7554. P. 89–93.

Синдром Ретта – тяжелое нейродегенеративное заболевание, вызываемое нарушением гена *MECP2*. Болезнь проявляется в основном у девочек в возрасте 12-18 месяцев и включает в себя потерю интеллектуальных, социальных и моторных навыков, сопровождается аутистическим поведением, например, повторяющимися движениями рук. У ребенка могут появиться судороги, тремор, затрудненное дыхание и желудочно-кишечные проблемы. В настоящее время не найдены способы лечения этого заболевания. Авторы обнаружили, что отсутствие белка MeCP2 вызывает сверхэкспрессию длинных генов. Понимание того, как работает белок *MECP2*, поможет лечить это расстройство. Ученые считают, что MeCP2 действует как регулятор для длинных генов, и его отсутствие нарушает нормальную структуру экспрессии генов, что приводит к болезни. Каждая клетка организма человека имеет

ДНК, содержащуюся в наборе генов. Тем не менее, клетки головного мозга отличаются от клеток сердца и печени, что связано с различиями в характере экспрессии генов. Средний ген содержит около 20 тыс. нуклеотидов, но некоторые могут иметь миллионы нуклеотидов. В ходе исследования авторы проанализировали различные наборы генной экспрессии. Они обнаружили, что гены при синдроме Ретта, как правило, имеют более 100 тыс. нуклеотидов в длину. Выяснилось, что когда белок MeCP2 отсутствует, длина гена увеличивается. Хотя увеличение экспрессии незначительно (от 3 до 10%), это относится к тысяче генов и поэтому может иметь существенное влияние на функцию головного мозга. Исследователи провели тесты и анализы, чтобы убедиться, что синдром Ретта вызывается избыточной экспрессией длинных генов при отсутствии MeCP2. При вскрытии мозга пациентов с синдромом Ретта и в ходе экспериментов с модельными мышами подтвердилось, что степень повышенной экспрессии длинных генов взаимосвязана с тяжестью заболевания. Ситуация выглядит обнадеживающей, так как существует класс препаратов, называемых ингибиторами топоизомеразы, которые снижают экспрессию длинных генов. Авторы уже начали тестировать препараты на мышах с синдромом Ретта.

В.В. Стрекопытов

Несовершенство проникновения антимикробных средств приводит к пространственной монотерапии и быстрому развитию множественной лекарственной резистентности

Imperfect drug penetration leads to spatial monotherapy and rapid evolution of multidrug resistance. Stefany Moreno-Gamez, Alison L. Hill, Daniel I. S. Rosenbloom, Dmitri A. Petrov, Martin A. Nowak, Pleuni S. Pennings. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. E2874–E2883.

Инфекции, обусловленные быстро развивающимися патогенными микроорганизмами, такими как ВИЧ, туберкулез, и гепатит В и С, часто лечат при помощи комбинаций препаратов с различными механизмами действия. Такая стратегия имеет существенные преимущества перед монотерапией в случаях, когда точная идентификация возбудителя не представляется возможной до начала «эмпирической терапии», или при инфекциях, которые имеют полимикробную этиологию, и использование нескольких препаратов увеличивает шансы на быстрое выздоровление. Одной из основных задач комбинированной терапии является снижение риска развития лекарственной устойчивости микроорганизмов, которая может возникнуть в процессе лечения пациента, особенно при длительном лечении хронических инфекций, которые можно контролировать, но не вылечить. Инфекции, вызванные лекарственно-резистентными штаммами, представляют серьезную клиническую проблему и несут в себе угрозу общественному здравоохранению. Усложняет эту ситуацию то, что отдельные препараты имеют «несовершенство проникновения», т.е. проникают по телу неравномерно, и могут быть регионы, где только один из препаратов достигает

эффективной концентрации. Авторы статьи предположили, что несогласованность зон действия лекарственных препаратов может значительно ускорить развитие множественной лекарственной устойчивости, позволяя микроорганизмам накапливать мутации поэтапно. Это несовершенное проникновение может значительно увеличить вероятность неудачи лечения заболеваний, вызванных вирусами, бактериями или паразитами. В ходе исследований была разработана математическая модель эволюции возбудителя внутри организма хозяина в условиях пространственной неоднородности действия лекарственных препаратов. Авторам статьи удалось продемонстрировать, что несовершенное проникновение может значительно увеличить вероятность неудачи лечения. Существование зон монотерапии, где только один препарат из комбинации достигает терапевтической концентрации, позволяют возбудителю развивать резистентность к каждому препарату последовательно, что быстро приводит множественной лекарственной устойчивости. Часто лучше использовать комбинации препаратов с подобранными профилями проникновения. В этом случае возможен компромисс между предотвращением возможной неудачи лечения, связанной с резистентностью и временным системным снижением уровней зараженности. Таким образом, в ходе исследования установлено, что даже при монотерапии наличие небольших зон, недоступных действию препарата, приводит к резкому повышению риска развития лекарственной резистентности. В более широком плане математическая модель, предложенная авторами статьи, дает количественную основу для рассуждений о компромиссах между агрессивной и умеренной лекарственными терапиями. Понимание факторов, влияющих на развитие у микроорганизмов множественной лекарственной устойчивости, является приоритетным направлением научных исследований.

С.В. Зворыкина

Моделирование стволовых клеток при синдроме Вернера выявило, что старение человека связано с изменениями гетерохроматина

A Werner syndrome stem cell model unveils heterochromatin alterations as a driver of human aging. Weiqi Zhang, Jingyi Li, Keiichiro Suzuki, et al. Science. 2015. Vol. 348. No 6239. P. 1160–1163.

Синдром Вернера – взрослый вариант прогерии (синдрома Хатчинсона-Гилфорда или синдрома преждевременного старения) – генетический дефект, связанный с дефицитом белка WRN. Болезнь вызывает мутация гена RecQ, который генерирует белок WRN. Нормальная форма этого белка отвечает за сохранность структуры ДНК человека, но когда он мутирует, то нарушается репарация ДНК, что и приводит к преждевременному старению. Авторы изучали механизмы старения, наблюдая за стволовыми клетками, которые получили от людей, больных прогерией. Ученые смогли превратить кожные клетки детей с синдромом Хатчинсона-Гилфорда в аналог эмбриональных стволовых клеток (индуцированные плюрипотентные стволовые клетки). Но когда то же самое попытались сделать с клетками больных синдромом Вернера, их клетки оказались слишком поврежденными, чтобы вернуться в недифференцированное состояние. Известно, что синдром Вернера сопровождается мутациями в гене WRN, который задействован в процессах копирования и репарации ДНК. До сих пор ученые не были уверены, какие именно нарушения происходят при этом на клеточном уровне. И только теперь комбинированная техника при создании модели синдрома Вернера позволила понять, что уда-

ление WRN приводит к сбоям в структуре гетерохроматина. Чтобы создать модель болезни, исследователи нарушили этот ген в стволовых клетках. Когда стволовые клетки с неработающим геном WRN превращались в мезенхимальные, они тут же начинали резко стареть: в их ДНК накапливалось много повреждений, они переставали делиться, и, наконец, у них сильно укорачивались теломеры. Однако у клеток больных синдромом Вернера была еще одна особенность. Известно, что ДНК в клеточном ядре находится в комплексе с белками. Некоторые из них выполняют текущие функции на тех или иных генах (например, синтезируют РНК), другие же играют структурную роль, поддерживая в упакованном состоянии довольно обширные фрагменты хромосом. Упакованная, структурированная часть ДНК называется гетерохроматином. Оказалось, что у больных клеток гетерохроматина очень мало – иными словами, их ДНК находится в неупакованном состоянии. То же самое наблюдается и при обычном старении – чем старше человек, тем хуже у него упакована ДНК в ядрах. С другой стороны, известно, что в гетерохроматиновом, запечатанном виде находятся мобильные генетические элементы, которые меняют свое местоположение в структуре ДНК, вызывая тем самым нежелательные мутации. В более широком смысле открытие предполагает, что накапливаемые изменения в структуре гетерохроматина могут быть главным сдерживающим фактором клеточного старения. Действительно ли общая распаковка ДНК влечет за собой изменения, характерные для стареющих клеток, и происходит ли так во всех случаях прогерии – покажут дальнейшие эксперименты. Но, если это так, биологи смогут сосредоточиться на упаковке ДНК как потенциальной мишени для лекарств, которые помогут бы задержать старение, как преждевременное, так и обычное.

В.В. Стрекопытов

Эффект сиалирования на фосфорилирование эпидермального фактора роста и его устойчивость к ингибиторам тирозинкиназной активности

Effect of sialylation on EGFR phosphorylation and resistance to tyrosine kinase inhibition. Hsin-Yung Yen, Ying-Chih Liu, Nai-Yu Chen, Chia-Feng Tsai, Yi-Ting Wang, Yu-Ju Chen, Tsui-Ling Hsu, Pan-Chyr Yang, Chi-Huey Wong. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. P. 6955–6960.

Одна из наиболее интенсивно изучаемых рецепторных тирозинкиназ, а именно, рецептор эпидермального фактора роста (EGFR), является молекулярной мишенью для разработки лекарств, направленных против различных форм рака. Показано, что киназная активность этого рецептора коррелирует с развитием опухолей. В нормальных условиях связывание лиганда (эпидермального фактора роста) с EGFR вызывает в молекуле рецептора конформационные изменения, характеризующиеся экспонированием поверхности интерфейса и его последующей димеризацией, активацией и аутофосфорилированием. Фосфорилирование EGFR определяет дальнейший ход событий, направленных на регуляцию пролиферации, выживания, миграции клеток и процесса ангиогенеза. В ходе интенсивных клинических исследований было установлено, что у значительного числа пациентов с немелкоклеточным раком легких и определенной формой аденокарциномы обнаруживаются мутации в киназном домене, вызывающие нарушение регуляции активности этого рецептора. Было показано, что примерно 90% ассоциированных мутаций представлены заменой остатка лейцина на аргинин в 858-ом положении (L858R) и делецией экзона 19, приводящей к отсутствию в молекуле белка четырех аминок-

кислотных остатков (LREA). Именно эти мутации обнаруживаются в пациентах с повышенной чувствительностью к ингибиторам тирозинкиназной активности (TKI), таким как gefitinib и erlotinib, широко используемым при лечении рака легких. Однако, у большинства пациентов с такими мутациями после терапии этими ингибиторами возникает устойчивость к действию этих лекарств, ассоциированная с возникновением в молекуле рецептора дополнительной мутации (T790M). Кроме того, в ходе исследования механизма действия EGFR было установлено, что гликановая часть этого белка также задействована в регуляции его активности. Было показано, что число гликанов и степень их ветвления могут определять экспрессию этого рецептора на поверхности клеток, а гликаны на остатках аспарагина 420 и 579 предотвращают его димеризацию. Ранее авторы настоящей работы показали, сиалирование молекулы EGFR подавляет его димеризацию и фосфорилирование. В настоящей работе авторы с помощью биохимических методов исследовали эффект сиалирования на профиль фосфорилирования EGFR в клетках, чувствительных к действию ингибиторов и в клетках, проявляющих устойчивость. Было показано, что сиалирование EGFR приводит к подавлению связывания ЭФР и димеризации молекулы рецептора. Было показано, что в отсутствие ЭФР TKI-резистентная форма EGFR с аминокислотными заменами L858R и T790M в большей степени сиалирована и фосфорилирована по остаткам тирозина Y1068, Y1086 и Y1173, чем TKI-чувствительный рецептор. Результаты, полученные авторами, свидетельствуют в пользу предположения, что сиалирование играет важную роль в развитии опухолей и их чувствительности к ингибиторам протеинкиназ, воздействуя на процесс фосфорилирования EGFR и ассоциированной сигнальной сети.

И.М. Мохосев

Идентификация с помощью метода скрининга фрагментов отличающихся друг от друга ингибиторов обратной транскриптазы вируса иммунодефицита человека HIV-1

Identification of mechanistically distinct inhibitors of HIV-1 reverse transcriptase through fragment screening. Jennifer La, Catherine F. Latham, Ricky N. Tinetti, Adam Johnson, David Tyssen, Kelly D. Huber, Nicolas Sluis-Cremer, Jamie S. Simpson, Stephen J. Headey, David K. Chalmers, Gilda Tachedjian. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. P. 6979–6984.

В 2012 г. во всем мире насчитывалось 35,3 млн ВИЧ-инфицированных людей. Пандемия ВИЧ/СПИД продолжает оставаться серьезной угрозой для человечества. В настоящее время для лечения ВИЧ применяется комбинированная анти-ретровирусная терапия, при которой используются три или более лекарств. Однако эффективность этого подхода в определенной степени ограничена резистентностью к лекарствам и их токсичностью. Кроме того, в стратегиях профилактики ВИЧ, которые уже были одобрены (например, Трувада), или же находятся на стадии разработки, применяются уже находящиеся в использовании лекарства против ВИЧ, что может привести к возникновению и передаче устойчивых к лекарствам штаммов вируса. Следовательно, существует острая потребность в разработке новых классов антиретровирусных лекарств, демонстрирующих новые механизмы. Обратная транскриптаза ВИЧ (HIV-1) играет ключевую роль в жизненном цикле вируса и была выбрана в качестве молекулярной мишени для терапии ВИЧ. Она представляет собой гетеродимер, образованный полипептидами р66 и р51, который превращает одноцепочечную вирусную геномную РНК в двуцепочечный провирусный ДНК-предшественник с помощью РНК- и ДНК-зависимой

полимеразной и РНКазной (РНКазы Н) активности. Из 26 одобренных лекарств 13 соединений действуют на обратную транскриптазу и, в то же время, предпринимаются попытки идентифицировать новые ингибиторы этого фермента. В настоящей работе авторы использовали метод ядерно-магнитного резонанса и методы измерения активности *in vitro*. Было идентифицированы ингибиторы обратной транскриптазы вируса иммунодефицита человека 1 (HIV-1), которые продемонстрировали новый механизм действия, отличающийся от действия нуклеозидных ингибиторов ((NNRTI – nonnucleoside RT inhibitor) и нуклеозидных/нуклеотидных ингибиторов (NRTI - nucleoside/nucleotide RT inhibitors). Было показано, что три соединения были способны в микромолекулярных концентрациях ингибировать РНК- и ДНК-зависимую ДНК-полимеразную активность обратной транскриптазы HIV-1. При этом они сохраняли способность ингибировать варианты обратной транскриптазы, несущие одну из трех основных аминокислотных замен, обуславливающих устойчивость к NNRTI: K103N, Y181C или G190A. Эти соединения также ингибировали обратную транскриптазу вируса лейкемии Молони (Moloney) у мышей, но они не оказывали воздействие на фрагмент Кленова ДНК-полимеразы I у *Esherichia coli*. Анализ стационарной кинетики показал, что один из этих фрагментов является конкурентным ингибитором обратной транскриптазы HIV-1 в случае субстрата дезоксирибонуклеозидтрифосфатной (dNTP) природы, в то время как второе вещество представляло собой конкурентный ингибитор полимеразной активности фермента в случае матрицы/праймера ДНК (T/P – template/primer) и также оно ингибировало активность РНКазы Н. Кроме того, было показано, что конкурирующий с dNTP ингибитор обратной транскриптазы также активен против NRTI-резистентных мутантов K65R и M184V. В целом, в ходе проведенной работы авторы обнаружили новые соединения, обладающие повышенной активностью в отношении обратной транскриптазы ВИЧ.

И.М. Мохосоев

Гипоксическая раковая секреция лизилоксидазы вызывает предметатические поражения костей

The hypoxic cancer secretome induces pre-metastatic bone lesions through lysyl oxidase. Thomas R. Cox, Robin M. H. Rumney, Erwin M. Schoof, et al. Nature. 2015. Vol. 522. No 7554. P. 106–110.

Рак молочной железы является наиболее распространенной формой онкологических заболеваний среди женщин. Когда раковые клетки распространяются из опухоли молочной железы в другие части тела, это определяется как метастатический или вторичный рак молочной железы. Чаще всего рак молочной железы распространяется на костную ткань, на которую метастазирует около 85% раковых клеток. Авторы обнаружили, что у пациентов с развитием вторичного рака были более высокие уровни фермента лизилоксидазы (lysyl oxidase, LOX), из-за чего кости постепенно разрушались или меняли структуру. LOX был идентифицирован как новый регулятор NFATc1-индуцированного остеокластогенеза, развивающегося независимо от RANK-лиганд и нарушающего

нормальный гомеостаз костей, что приводит к образованию локальных предметатических поражений. В серии экспериментов на мышах было показано, что этот фермент поражает кости, делая их пористыми, обеспечивая циркулирующим опухолевым клеткам проникновения и образования метастазов в костях. Исследователи предполагают, что блокирование активности LOX может привести к новым способам предотвращения вторичного рака у пациентов с раком молочной железы. Для анализа секреции белка опухолей у пациентов с ER-положительным раком молочной железы авторы использовали методы масс-спектрометрии. Обнаружилось, что когда клетки рака молочной железы лишены кислорода, они производят высокие уровни LOX. Авторы считают, что заблокировать лизилоксидазу можно с помощью препарата бисфосфоната, который используется для лечения костных заболеваний, таких как остеопороз, и лечение этим препаратом пациентов с раком молочной железы может остановить распространение патологии на костную ткань. Исследования на животных подтвердили, что бисфосфонаты способствуют приостановке распространения метастазов.

В.В. Стрекопытов

Кинетически сопряженное сворачивание единичного комплекса гликопротеина 41 ВИЧ-1 при слиянии вирусной мембраны и ингибировании

Kinetically coupled folding of a single HIV-1 glycoprotein 41 complex in viral membrane fusion and inhibition. Junyi Jiao, Aleksander A. Rebane, Lu Ma, Ying Gao, Yongli Zhang. PNAS. 2015. Vol.112. No 22. E2855–E2864.

Вирусы, обладающие внешней оболочкой, инфицируют клетки через слияние вирусной мембраны с мембраной клетки-хозяина с помощью высоко консервативных фузионных белков. Гликопротеин 41 ВИЧ-1 (gp41) представляет семейство фузионных белков, характеризующихся сходными структурами и механизмами действия. Эти белки осуществляют через формирование тримеров спиральных шпильчатых структур сопряжение энергетике процесса сворачивания и сближения и слияния двух мембран. Они являются основными белками на поверхности вирусов и поэтому представляют особый интерес для получения вакцин и разработки ингибиторов слияния вирусов с мембранами клеток, чтобы получить лекарства для борьбы с основными инфекционными заболеваниями, вызываемыми вирусами, такими как СПИД, Эбола и грипп. Гомотример белка gp41 образует трансмембранный ствол сложного гликопротеинового комплекса Env (envelope glycoprotein complex) и играет ключевую роль в проникновении вируса в клетку. Процесс сворачивания Gp41 блокируется ингибиторами слияния мембран, включая коммерческое лекарство T20, применяемое для лечения ВИЧ/СПИД. Однако до сих пор нет ясности насчет интермедиатов сворачивания этого белка, энергетике

и кинетики самого процесса. В настоящей работе авторы использовали оптические твизоры высокого разрешения и идентифицировали промежуточные продукты сворачивания gp41 и измерили сопровождающие этот процесс изменения энергии и его кинетику. Было показано, что сворачивание шпильчатых структур белка gp41 протекает энергетически независимо друг от друга, но кинетически их сворачивание сопряжено друг с другом: каждая шпилька вносит вклад в энергию сворачивания в размере примерно –23 кВТ, но в то же время сворачивание одной шпильки приводит к значительному ускорению (в ~20 раз) сворачивания следующей шпильки. На имитирующих биологические мембраны мицеллах было показано, что в этом случае происходит понижение скорости сворачивания белка gp41 и при этом наблюдается снижение стабильности узла, образованного шестью спиралями. Однако стабильность этого участка может быть восстановлена при кооперативном сворачивании участка белка, находящегося в отдалении от мембраны. Кроме того, авторами было показано, что лекарство T20 строго ингибирует сворачивание белка gp41, активно вытесняя С-концевую шпильку. Ингибирующий эффект T20 отменялся в случае мутации в gp41, приводящей к возникновению устойчивости к действию T20. В целом, в настоящей работе авторами было показано, что структуры типа «шпилька белка gp41» последовательно сворачиваются друг за другом. Также был продемонстрирован ранее неизвестный механизм действия лекарства против ВИЧ. Полученные авторами результаты по энергетике и кинетике процесса сворачивания гликопротеина 41, основного поверхностного белка ВИЧ, могут быть использованы для понимания механизмов слияния мембран, инфицирования клеток вирусом и разработки лекарств против особо опасных вирусных инфекций.

И.М. Мохошеев

Нейронауки и психология

Изменение процесса восприятия фигуры и фона в зрительном бугре приматов

Figure-ground modulation in awake primate thalamus. Helen E. Jones, Ian M. Andolina, Stewart D. Shipp, Daniel L. Adams, Javier Cudeiro, Thomas E. Salt, Adam M. Sillito. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. E7085–E7090.

Считается, что зрительная система человека воссоздает объекты окружающего мира из многообразных составных частей. Это происходит на начальном этапе обработки поступающей визуальной информации за счет объединения фрагментов изображения в единую группу и дальнейшего их отделения от фона в качестве фигуры. С этой точки зрения, нейронные механизмы распознавания фигуры и фона связаны с процессами, которые возникают в первичном и высших отделах зрительной коры головного мозга. Важно понять, существуют ли признаки высокоуровневых процессов, свойствен-

ных коре, в зрительном бугре. Предполагается, что информация, полученная от таламуса, не подвергается значительным изменениям и лежит в основе способности различать фигуру от фона и наоборот. В исследовании рассматривались записи активности бокового коленчатого ядра зрительных бугров 2 приматов, пребывавших в состоянии бодрствования. Животным демонстрировались визуальные стимулы в виде точек, которые сначала находились в статичном положении, а затем перемещались, очерчивая квадрат. Результаты показали, что стимул, описывающий контуры фигуры, может сильно менять активность клеток латерального коленчатого ядра. Возможно, деятельность коры головного мозга порождает восприятие более высокого порядка и вместе с тем возвращается на более низкий, в анатомическом плане, уровень — зрительный бугор. Как следствие, входящий визуальный сигнал подтверждает то изображение, которое, согласно мнению смотрящего, он видит.

С.А. Завалишина

Префронтально-таламо-гиппокампальный нейронный контур необходим для целенаправленной пространственной навигации

A prefrontal–thalamo–hippocampal circuit for goal-directed spatial navigation. Hiroshi T. Ito, Sheng-Jia Zhang, Menno P. Witter, Edvard I. Moser, May-Britt Moser. Nature. 2015. Vol. 522. No 7554. P. 50–55.

Гиппокампальные «клетки места» (place cells), описанные Джоном О'Кифом, являются частью «когнитивной карты», которая позволяет животным ориентироваться в пространстве и двигаться в нужном направлении (O'Keefe, 1971, 1978). Клетки места обеспечивают точную информацию о текущем местоположении, но остается неясным, как такая карта используется животными, чтобы планировать перемещение к цели, которая расположена в другом месте пространства, так как целенаправленная навигация требует непрерывного анализа информации о соотношении между текущим и будущим положением тела в пространстве. В активности нейронов гиппокампа, по-видимому, отражаются такие отношения, представляющие не только непосредственное положение животного в пространстве, но и траекторию движения к целевому «пункту назначения». Однако, как именно гиппокамп получает информацию о направлении, в котором расположена цель, неизвестно. Авторы исследования предположили, что выбор будущей траектории зависит от более широкой нейронной сети, включающей в себя не только гиппокамп, но и структуры, участвующие в оценке и выборе действий, в частности, префронтальную кору. Известно, что нейроны в медиальной префронтальной коре (mPFC) не имеют проекций непосредственно в гиппокамп, но соединяющее ядро таламуса (nucleus reuniens,

NR), которое имеет реципрокные анатомические связи с mPFC, может служить «функциональным мостом» в гиппокампальную формацию, поскольку, согласно данным литературы, NR имеет сильные терминальные поля афферентных входов в поле CA1 гиппокампа. В ходе исследования авторы ответили на вопрос, как информация о будущем выборе направления движения отражается в импульсной активности гиппокампальных клеток места. Импульсную активность нейронов гиппокампа регистрировали у крыс в задаче с чередованием выбора направления движения в «непрерывной» версии Т-образного лабиринта. Воздействуя на различные участки цепи mPFC–NR–CA1, авторы исследования попытались определить, является ли этот нейронный контур необходимым для способности клеток места кодировать будущую траекторию движения. Результаты исследования показали, что в медиальной префронтальной коре, соединяющем ядре таламуса и в поле CA1 гиппокампа крыс импульсная активность нейронов связана с траекторией движения животных. Повреждение или оптогенетическое подавление соединяющего ядра таламуса существенно снижает разрядную активность нейронов поля CA1, связанную с траекторией движения. Обнаружено, что импульсная активность клеток поля CA3, которые не получают прямые входы от NR, мало зависит от траектории движения. Эти данные позволяют предположить, что проекции от медиальной префронтальной коры через соединяющее ядро таламуса, имеют решающее значение для репрезентации будущей траектории движения во время целенаправленного поведения. Соединяющее ядро таламуса представляет собой ключевой узел нейронного контура, который связывает между собой регионы мозга, вовлеченные в навигацию, и обеспечивает планирование маршрута на основе когнитивной карты пространства, по которому движется животное.

С.В. Зворыкина

Эпигенетические изменения в развивающемся мозге: влияние на поведение

Epigenetic changes in the developing brain: Effects on behavior. Eric B. Keverne, Donald W. Pfaff, Inna Tabansky. PNAS. 2015. Vol. 112. No. 22. P. 6789–6795.

Данный документ служит введением к 12 статьям, которые появились благодаря коллоквиуму Артура М. Саклера «Эпигенетические изменения в развивающемся мозге: влияние на поведение» и опубликованы в этом же номере PNAS. Этот коллоквиум состоялся 28-29 марта 2014 г. в Национальной Академии наук в Вашингтоне, округ Колумбия (National Academy of Sciences in Washington, DC). Полная программа и видеозапись большинства презентаций доступны на веб-сайте NAS: www.nasonline.org/Epigenetic_changes_pges. Целью коллоквиума Саклера, охватившего широкий круг вопросов, было объединение экспертов в двух областях — химии эпигенеза и поведенческой неврологии. Термин «эпигенетика» был введен Конрадом Уоддингтоном в 1946 г., чтобы описать связь фенотипа с генотипом в процессе развития. В последние годы стремительно возрастает число исследований, посвященных эпигенетике. Понимание биохимии эпигенетических модификаций расширяется быстрыми темпами, но большинство ключевых открытий в этой области делаются не в нервной ткани. При этом молекулярные генетики и биохимики, которые исследуют метилирование ДНК, модификацию гистонов и некодирующую РНК понимают, что некоторые из самых захватывающих применений их открытий лежат в центральной нервной системе, но для таких ученых подходы с использованием поведенческих

тестов, например, далеки от их научного опыта. В цикле работ, который последовал за коллоквиумом Саклера, был сделан акцент на механизмах, включающих метилирование ДНК, геномный импринтинг, модификацию гистонов, некодирующую РНК, и эти новые знания применены для объяснения нейронных механизмов поведения, там, где это было возможно. На сегодняшний день наиболее легко исследовать в свете эпигенетических механизмов такие поведенческие системы (формы поведения), которые не нуждаются в обучении. На коллоквиуме Саклера обсудили механизмы материнского поведения, сексуальное поведение и стресс, поведение контролируемое гипоталамусом. Обсуждались механизмы циркадно-регулируемого поведения, которое явно представляет собой случай нормального поведения, регулируемого эпигенетически, а так же проблемные и аномальные формы поведения, такие, как при синдроме Прадера-Вилли и изменения в поведении при старении. Действительно, эпигенетика воплощена в развитии мозга больше, чем в любой другой структуре. Миллиарды нейронов, триллионы синаптических взаимосвязей означают, что нет двух одинаковых мозгов. Даже монозиготные близнецы обнаруживают различия в поведении и психические нарушения, которые становятся более заметными с возрастом. И, как сообщалось в ряде докладов на коллоквиуме Саклера, ранний опыт (материнский уход, стресс) приводит в действие наследственные изменения в эпигеноме мозга. Кроме того, в ходе встречи с Фредом Гейджем (Gage, F.H.) обсуждался потенциальный вклад транспозонов в регуляцию экспрессии в связи с расширением возможностей нейропластичности; нерешенные вопросы, вытекающие из этой встречи, представлены в соответствующем разделе (Outstanding Questions) данной статьи.

С.В. Зворыкина

Ген GIRK3 активировать мезолимбический дофаминовый путь под воздействием этанола

GIRK3 gates activation of the mesolimbic dopaminergic pathway by ethanol. Melissa A. Herman, Harpreet Sidhu, David G. Stouffer, Max Kreifeldt, David Le, Chelsea Cates-Gatto, Michaelanne B. Munoz, Amanda J. Roberts, Loren H. Parsons, Marisa Roberto, Kevin Wickman, Paul A. Slesinger, Candice Contet. PNAS. 2015. Vol. 112. No. 21. P. 7091–7096.

G-белок-связанные входящие калиевые каналы (GIRK) являются критическими регуляторами нейронной возбудимости и могут напрямую активироваться этанолом. Тем не менее, роль GIRK-каналов в проявлении поведенческого эффекта, обусловленного действием этанола, до конца не выяснена. В статье сообщается об обнаружении в ДНК человека особого гена GIRK3, отвечающего за синтез белка, нарушение работы которого в организме мышей превращало их в запойных алкоголиков. Существенная делеция гена GIRK3 имеет минимальные фенотипические последствия. Исключение составляет ответная реакция на препараты, вызывающие зависимость. Наблюдая за изменениями в работе мозга мышей при появлении в нем больших количеств молекул этилового спирта, авторы нашли потенциальное объяснение тому, почему некоторые люди более склонны к запойному алкоголизму. Экспериментируя на отдельных нервных клетках в предыдущие годы, авторы статьи уже заметили, что алкоголь сильно влияет на работу особых каналов на поверхности нейронов, которые кодируются генами из семейства GIRK. Эти каналы играют важную роль в жизни клеток, управляя силой выработываемого ими сигнала. В рамках данного исследования уче-

ные сконцентрировали свое внимание на гене GIRK3 и белке, через который действует кокаин и оксибутират натрия (популярный уличный стимулятор). Они проверили, связан ли он с формированием зависимости или другими проявлениями алкоголизма, повредив данный ген в ДНК нейронов мозга мыши. Изначально не наблюдалось сильных изменений — генномодифицированные мыши столь же охотно употребляли алкоголь и он столь же быстро выводился из крови подопытных мышей, как и у их нормальных сородичей. Однако когда авторы перешли к экспериментам, имитирующим длительное потребление алкоголя, они раскрыли неожиданный эффект. Когда мыши имели доступ к алкоголю только на протяжении 2 часов в сутки, грызуны с отключенным геном GIRK3 приходили в состояние сильного опьянения, выпивая намного больше спирта, чем их нормальные сородичи. Данный эффект связан с тем, что в организме нормальных мышей алкоголь усиливает частоту и силу импульсов в центре удовольствия, действуя на каналы GIRK3 и заставляя их пропускать больше ионов внутрь нейронов, чем этого требуется. Поэтому, вероятно, мыши с удаленным геном GIRK3 «уходят в запой» по той причине, что алкоголь начинает действовать на них слабее, чем на их нормальных сородичей. Что интересно, добавление дополнительных копий этого гена в центр удовольствия в мозге мышей приводило к обратному эффекту — такие грызуны пили значительно меньше, чем особи из контрольной группы. Это, как считают авторы, дает надежду на то, что проблему запойного пьянства можно решить медицинским путем, если ученым удастся синтезировать такое вещество, которое бы усиливало работу GIRK3-каналов в организме хронических алкоголиков и помогло бы им выходить из запоев.

В.В. Стрекопытов

Ретинальные волны регулируют направленность афферентных окончаний в процессе развития зрительных путей

Retinal waves regulate afferent terminal targeting in the early visual pathway. Samuel Faylor, Barbara Chapman, Hwai-Jong Cheng. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. E2957–E2966.

В развитии зрительной системы высокая специфичность связей между сетчаткой и дорзальным латеральным колленчатым телом таламуса (dLGN) достигается благодаря действию нескольких факторов. На начальных этапах афферентные терминалы направляются градиентами молекул аксонального наведения, а затем спонтанная активность клеток сетчатки (ретинальные волны) приводит к установлению точных связей в соответствии с принципом Хебба на основании конкуренции зрительных афферентов от разных глаз (интраокулярная конкуренция) и от одного глаза (интраокулярная конкуренция). В результате этих процессов происходит глазеспе-

цифичная сегрегация афферентных волокон и формируется ретинотопия в dLGN. Авторы исследовали роль ретинальных волн в регулировании ретино-таламических связей методом монокулярной энуклеации у детенышей хорька в 1 постнатальный день. В интактном глазу фармакологически блокировали ретинальные волны II стадии введением холинергического агониста эпибатидина с 1 по 10 день. Авторы показали, что, в условиях разрушения интерокулярной конкуренции путем монокулярной энуклеации, блокада II холинергической стадии ретинальных волн нарушает процесс расширения ретино-таламической проекции, обусловленное интраокулярной конкуренцией, и приводит к необратимой дезорганизации слоев dLGN. Кроме того, блокада ретинальных волн вызывает долгосрочные изменения в размерах рецептивных полей и в тонкой ретинотопии. Полученные данные доказывают необходимость ретинальных волн II стадии для точного установления связей между сетчаткой и dLGN, в результате чего формируется нормальный ламинарный паттерн dLGN и равномерное распределение синапсов.

А.А. Тунова

Регуляция фосфорилирования AMPA рецепторов нейропептидом PACAP38

Regulation of AMPA receptor phosphorylation by the neuropeptide PACAP38. Alyssa M. A. Toda, Richard L. Huganir. PNAS. 2015. Vol. 112. No 21. P. 6712–6717.

Динамические изменения в силе синаптических связей считаются основным механизмом обучения и памяти. Изменения силы синапсов могут происходить в результате модуляции функций AMPA рецепторов (AMPA) и их транспортировки к синапсу. Одним из механизмов регуляции этих процессов в клетке является фосфорилирование субъединиц AMPAR, которое, в свою очередь, регулируется экстраклеточными сигналами – нейрональной активностью, нейропептидами и нейромедиаторами. Известно, что нейропептид PACAP38 (pituitary adenylate cyclase activating polypeptide 38; пептид, активирующий аденилатциклазу гипофиза) способен изменять силу синапсов в области CA1 гиппокампа и локализацию субъединицы GluA1 в синапсе. В то же время, влияние PACAP38 на статус фосфорилирования

AMPA ранее не исследовалось. Авторы показали, что стимуляция гиппокампальных нейронов в культуре нанесением PACAP38 увеличивала фосфорилирование серина S845 и снижала фосфорилирование треонина T840 в GluA1-субъединице AMPAR. PACAP38 способен связываться с 3 типами рецепторов, связанных с G-белком – PAC1, VPAC1 и VPAC2, в результате чего повышается уровень цАМФ и Ca²⁺, происходит активация фосфолипаз C и D. Авторы обнаружили, что усиление фосфорилирования GluA1 по S845 происходило преимущественно через активацию рецепторов PAC1 и VPAC2, в то время как снижение фосфорилирования T840 вовлекало в основном активацию PAC1. Фосфорилирование S845 блокировалось ингибитором протеинкиназы A, а дефосфорилирование T840 нарушалось ингибитором протеинфосфатазы 1/2A (PP1/PP2A) и, частично, антагонистом NMDA рецепторов. Полученные данные показывают, что нейропептид PACAP38 противоположным образом регулирует фосфорилирование двух разных сайтов субъединицы GluA1 и может играть существенную роль в модулировании функций AMPAR и синаптической пластичности в мозге.

А.А. Тунова

Пространственно-временные паттерны экспрессии и нарушения транскрипции длинных некодирующих РНК в мозге мыши

Spatiotemporal expression and transcriptional perturbations by long noncoding RNAs in the mouse brain. Loyal A. Goff, Abigail F. Groff, Martin Sauvageau, Zachary Trayes-Gibson, Diana B. Sanchez-Gomez, Michael Morse, Ryan D. Martin, Lara E. Elcavage, Stephen C. Liapis, Meryem Gonzalez-Celeiro, Olivia Plana, Eric Li, Chiara Gerhardinger, Giulio S. Tomassy, Paola Arlotta, John L. Rinn. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. P. 6855–6862.

Во время развития мозга процессы специализации и дифференциации клеток регулируются комплексом транскрипционных программ, среди которых существенную роль играют длинные некодирующие РНК (Long noncoding RNAs, lncRNAs). Этот тип РНК широко представлен в мозге млекопитающих, причем локализация lncRNAs зависит от области мозга и типа клеток. В данной работе авторы исследовали пространственно-временные паттерны

экспрессии 13 lncRNAs в мозге мышей методом вставки репортерного гена *lacZ* и последующей детекции его экспрессии на срезах развивающегося мозга (эмбрионы E14.5) и мозга взрослых животных. Для выяснения функциональной роли lncRNAs авторы использовали линии мышей с нуль-мутацией в локусах одной из 13 lncRNAs и оценивали транскрипционные изменения у мутантов по сравнению с животными дикого типа. Авторы показали, что экспрессия lncRNAs изменяется в зависимости от времени и места, причем некоторые lncRNAs экспрессируются в строго ограниченных областях мозга. Делеция локусов lncRNAs у мутантов изменяла регуляцию экспрессии генов во многих клеточных каскадах и процессах. Кроме того, 4 из 13 lncRNAs существенно изменяли экспрессию нескольких соседних кодирующих участков ДНК в цис-положении. Полученные на развивающемся и взрослом мозге данные о паттернах эндогенной экспрессии lncRNAs и транскрипционных изменениях, вызванных их делецией, позволяют в дальнейшем исследовать роль этих генов в развитии нервной системы, функциях мозга и патологиях.

А.А. Тунова

Применение системы рецептор–оболочка вируса саркомы/лейкоза птиц для одновременного анализа множественных нервных сетей в мозге млекопитающих

Avian sarcoma virus receptor-envelope system for simultaneous dissection of multiple neural circuits in mammalian brain. Makoto Matsuyama, Yohei Ohashi, Tadashi Tsubota, Masae Yaguchi, Shigeki Kato, Kazuto Kobayashi, Yasushi Miyashita. PNAS. 2015. Vol.112. No 22. E2947–E2956.

Для исследования сложных нервных систем, в которых близко расположенные нейроны могут проецироваться в разные структуры и участвовать в выполнении разных функций, требуется возможность введения гена в нейроны конкретных нервных сетей. Однако традиционные методы вирусной доставки гена не позволяют достичь высокой эффективности проникновения и низкой кросс-реактивности. Одним из перспективных направлений в этой области является использование специфических комбинаций белков вирусной оболочки (Env-белки) и соответствующих им клеточных рецепторов. Поскольку вирусные векторы, псевдотипированные белками Env, способны проникать только в клетки, экспрессирующие соответствующие им рецепторы, экзогенное введение генов рецепторов в клетки-мишени обеспечивает их избирательное инфицирование вектором. В данной работе авторы использовали вирус саркомы/лейкоза птиц (ASLV), псевдотипированный белками оболочки EnvA, EnvB, EnvC или EnvE, и искусственно сконструированные рецепторы к ним, созданные на основе белков птиц (TVA950, TVB S3, TVC, TVB T и DR-46TVB). В работе проведен *in vitro* скрининг всех возможных пар рецептор–оболочка, образованных комбинацией 4 белков оболочки и 5 искусственных

рецепторов к ним. В исследовании на культуре нейронов для 4 из 20 пар обнаружены высокие коэффициенты инфицирования (TVA–EnvA – 99,6%, TVB S3–EnvB – 97,7%, TVC–EnvC – 98,2%, DR-46TVB–EnvE – 98,8%) в сочетании с низкой кросс-реактивностью (< 2,5%). Далее авторы протестировали эти 4 эффективные пары рецептор–оболочка *in vivo* в мозге крысы для введения гена в нейроны, принадлежащие к определенной нервной сети. В таламо-кортикальные и кортико-кортикальные нейроны, проецирующиеся в выбранный участок первичной соматосенсорной коры, были введены гены рецепторов методом ретроградной доставки. Через 3 недели животным вводили в область таламуса смесь вирусных векторов (EnvA, EnvB, EnvE), каждый из которых экспрессировал свой флуоресцентный белок, и оценивали проникновение каждого вируса в клетки, экспрессирующие соответствующий рецептор. Для 3 из 4 пар обнаружена избирательная трансдукция вируса в таламо-кортикальные нейроны, экспрессирующие соответствующий рецептор (проникновение более чем в 98% клеток), без видимой кросс-реактивности. В следующем эксперименте авторы ввели все 3 типа рецепторов в разные участки соматосенсорной коры одного животного, в результате чего было достигнуто сеть-специфическое дифференцированное флуоресцентное мечение трех популяций таламических нейронов, каждая из которых проецировалась в отдельный участок коры. В результате работы идентифицированы 3 непересекающиеся пары рецептор–оболочка ASLV и создана новая векторная система, обеспечивающая инструмент для одновременного, независимого и высоко специфичного введения генов в множество клеток-мишеней в мозге *in vivo*. Этот подход может широко применяться для сеть-специфичного мечения нейронов и функционального анализа нейрональных систем.

А.А. Тунова

Экспансия повторов в гене *C9ORF72* у мышей вызывает патологию белка TDP-43, гибель нейронов и нарушения поведения

C9ORF72 repeat expansions in mice cause TDP-43 pathology, neuronal loss, and behavioral deficits. Jeannie Chew, Tania F. Gendron, Mercedes Prudencio, et al. Science. 2015. V. 348. No 6239. P. 1151–1154.

Главной генетической причиной лобно-височной деменции и бокового амиотрофического склероза является экспансия повторов G_4C_2 в гене *C9ORF72*. На животных пока не описано хороших моделей этих заболеваний, которые бы воспроизводили сходные симптомы, и это приводит к сложностям создания подходящего лечения нейродегенеративных заболеваний, опосредуемых этим геном. В данной статье описывается модель на мышах, воспроизводящая как нейropатологический, так и клинический фенотип. В описываемой модели удалось добиться экспрессии $(G_4C_2)_{66}$ в мышечной центральной нервной системе посредством трансгенеза

с помощью адено-ассоциированного вируса. У этих трансгенных мышей обнаруживались очаги ядерной РНК повторов G_4C_2 в коре головного мозга, в мозжечке, гиппокампе и спинном мозге. В различных зонах мозга были обнаружены включения белков с повторами дипептидов Gly-Pro, Gly-Ala и Gly-Arg, а также патология белка TDP-43. Число зрелых нейронов у этих мышей было снижено по сравнению с контрольными мышами, в частности, наблюдалось снижение числа кортикальных нейронов и нейронов мозжечка (а именно, клеток Пуркинье), и астроглиоз. Вес этих мозгов также оказался снижен по сравнению с контрольными. Трансгенные мыши также демонстрировали нарушения поведения, похожие на клинические симптомы пациентов с лобно-височной деменцией и боковым амиотрофическим склерозом, опосредуемые мутациями данного гена. В частности, у них наблюдалась гиперактивность, тревожность, антисоциальное поведение и моторные нарушения. Таким образом, описанная модель может быть полезна для разработки терапевтического лечения нейродегенеративных заболеваний.

О.Е. Сварник

Метилирование гена BDNF как биомаркер неблагоприятных факторов в раннем периоде жизни

DNA methylation of BDNF as a biomarker of early-life adversity. Marija Kundakovic, Kathryn Gudsnuik, Julie B. Herbstman, Deliang Tang, Frederica P. Perera, Frances A. Champagne. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. P. 6807–6813.

Неблагоприятные факторы в раннем периоде жизни повышают риск последующего развития психопатологий. Хотя механизмы этой закономерности неизвестны, считается, что определенную роль в ней играют эпигенетические процессы. Ранние неблагоприятные воздействия могут нарушить эпигенетическую программу развития мозга, что приводит к длительным последствиям как в экспрессии генов, так и в поведении. Доказательства этой связи получены преимущественно в экспериментах на животных, поскольку исследования на человеке ограничены невозможностью работы с тканями мозга. Несмотря на то, что существуют доказательства изменений статуса метилирования ДНК в периферической крови психиатрических пациентов, тканеспецифичность эпигенетических процессов не позволяет ответить на фундаментальный вопрос: возможно ли на основании данных по эпигенетическим маркерам в крови предсказать эпигенетические изменения в мозге. Авторы исследовали влияние на плод бисфенола А (БФА) — вещества, входящего в состав многих пластмасс, которое может нарушать развитие нервной системы и оказывать долгосрочные эффекты на поведение животных и человека. БФА ежедневно вводили беременным самкам мышей линии BALB/c в дозе 0,2 мг/кг и оценивали его влияние на экспрессию гена *BDNF* и метилирование ДНК в мозге потомства, а также на поведение выросших детенышей. Нейротрофический фактор BDNF (brain-derived

neurotrophic factor) играет ключевую роль в развитии нервной системы; изменение его активности коррелирует как с ранними неблагоприятными факторами, так и с психиатрическими рисками. Авторы показали, что пренатальное воздействие БФА приводит к долгосрочным изменениям метилирования ДНК в транскрипционно активной области гена *BDNF* в гиппокампе мышей. У самцов в возрасте 28 и 60 дней наблюдалось снижение экспрессии *BDNF* в гиппокампе, связанное с гиперметилированием IV экзона. При этом уровень метилирования *BDNF* в гиппокампе коррелировал с уровнем его метилирования в крови как у контрольных животных, так и у подвергавшихся действию БФА. В поведении самцов, подвергавшихся действию БФА, выявлено нарушение памяти в гиппокампе-зависимом обучении узнавания объекта. Для проверки обнаруженных эффектов у человека были исследованы образцы пуповинной крови 198 детей, подвергавшихся воздействию БФА во время внутриутробного развития. Исследование выявило изменения метилирования *BDNF*, аналогичные обнаруженным у мышей. В поведении таких детей в возрасте 3–5 лет выявляются отклонения от нормы, причем также в зависимости от пола: у мальчиков наблюдались нарушения эмоционального баланса и повышенная агрессивность, а у девочек — снижение уровня тревожности и депрессии, а также агрессивного поведения. В целом, полученные данные предполагают, что уровень метилирования *BDNF* в крови может служить предиктором уровня его метилирования и экспрессии в мозге, а также поведенческих отклонений, вызванных ранним воздействием БФА. Поскольку экспрессия *BDNF* и метилирование ДНК изменены при ряде психиатрических расстройств, связанных с неблагоприятными факторами в начале жизни, уровень метилирования *BDNF* может также служить биомаркером для ранней детекции психопатологий.

А.А. Тунова

Прогностическая информация в популяции сенсорных нейронов

Predictive information in a sensory population. Stephanie E. Palmer, Olivier Marre, Michael J. Berry II, William Bialek. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. P. 6908–6913.

Прогнозирование является неотъемлемой частью жизни. Пытаемся ли мы ловить добычу, избегать хищников или просто двигаться в сложной пространственной среде, данные, которые мы собираем через наши органы чувств, могут направлять наши действия лишь постольку, поскольку эти данные дают информацию о будущем состоянии мира. Авторы статьи применили теорию информации, чтобы проанализировать принципы эффективного кодирования прогностической информации популяцией нейронов сетчатки и модельной популяцией нейронов. По мнению авторов, целенаправленное поведение возможно при условии, что мозг способен делать предсказания относительно будущих событий в виде значений сенсорных входов на нейронах. Почти все этапы обработки информации нейронами включают в себя прогнозирование. Однако, как именно осуществляется этот прогноз? Какие именно структуры нашего мозга являются «оптимальными предикторами»? Важным аспектом прогнозирования во всех формах — от экстраполяции траекторий движущихся объектов до изучения абстрактных правил — является то, что не все детали прошлых событий обладают предсказательной силой. Поэтому, поскольку представление и передача информации имеет определенную стоимость, естественно предположить, что сенсорные системы обладают оптимизированными стратегиями кодирования, которые содержат лишь ограниченное число битов информации о

прошлом, обеспечивая при этом максимальную информативность этих битов в будущем. Авторы полагают, что такая результативность не может быть объяснена с помощью классических моделей разрядной активности ганглиозных клеток. Используя мультieleктродную регистрацию активности нейронов сетчатки личинок тигровой саламандры, авторы статьи обнаружили, что группы нейронов в сетчатке действительно способны максимально эффективно отделять прогностическую информацию от «непрогностического» (nonpredictive) фона и показали, что эффективное «прогностическое вычисление» (predictive computation) начинается на самых ранних этапах обработки информации в зрительной системе. В своем исследовании авторы статьи провели вычисления, как много информации могут нести группы ганглиозных клеток сетчатки о будущем состоянии своих визуальных входов. Кроме того, авторы показали, что почти каждая клетка сетчатки участвует в группе клеток, для которых эта прогностическая информация близка к физическому пределу установленной статистической структурой их собственных входов. Таким образом, группы клеток в сетчатке несут информацию о будущем состоянии их собственной активности, и эти сведения могут быть сжаты и закодированы в дальнейшем «предикторными нейронами», обладающими функцией селективности, которая обеспечивает прогностические вычисления. Эффективное представление прогностической информации является принципом, который может быть применен и на последующих этапах обработки поступающих сигналов, когда мозг пытается предсказать будущие паттерны нейронной активности. Подход, предложенный авторами статьи, предполагает, что прогнозирование является более общей проблемой, которая может быть описана математически единым образом для многих случаев.

С.В. Звoryкина

Искусственное удлинение светового дня способствует ожирению вследствие ослабления активности бурой жировой ткани

Prolonged daily light exposure increases body fat mass through attenuation of brown adipose tissue activity. Sander Kooijman, Rosa van den Berg, Ashna Ramkisoensing, et al. PNAS. 2015. Vol. 112. No 21. P. 6748–6753.

Многие люди бодрствуют по ночам — либо потому, что таковы условия их работы, либо потому, что им больше нравится такой режим. Результаты проведенного ранее исследования с участием 100 тыс. женщин показали, что у женщин, предпочитающих такой образ жизни, чаще наблюдается ожирение. Авторы решили провести эксперимент на мышах, чтобы проверить, не вызывает ли искусственное удлинение светового дня какие-то сдвиги в метаболизме, из-за которых появляется предрасположенность к ожирению. Известно, что супрахиазматическое ядро мозга следит за световым циклом и рассылает сигналы на периферию, чтобы все клетки организма могли подстроить свои внутренние часы. В соответствии с показаниями этих часов меняется интенсивность многих важных процессов — например, поглощения глюкозы, которое зависит от чувствительности к инсулину, которая, в свою очередь, изменяется с ходом биологических часов (днем чувствительность к инсулину ниже, чем ночью). Зависят от времени суток и количества синтезируемых белков, фосфолипидов и ДНК — параметры, важные для всех клеток организма без исключения (днем процессы синтеза этих молекул идут активнее, чем ночью). В эксперименте мышей поделили на три группы: у первой группы темное и светлое время суток были равными по продолжительности, у второй световой день был удлиненным и продолжался 16 часов,

а у третьей — день длился круглые сутки. Чем дольше был световой день, тем больше жира у мышей откладывалось. Спустя 5 недель мыши, жившие при постоянном освещении, были в 1,5 раза толще, чем мыши, у которых световой день был равен ночи. Мыши могли есть, сколько хотели, но оказалось, что мыши с 16-часовым световым днем ели не больше мышей с 12-часовым, а мыши, которые жили при постоянном освещении, ели вообще меньше всех. Получается, ожирение у них возникало не из-за перекармливания. Общее время активности у мышей при удлиненном световом дне не уменьшалось, так что и недостаток движения не был причиной увеличения веса. Примечательно, что супрахиазматическое ядро напрямую связано нервными путями с бурой жировой тканью, которая сжигает липиды для того, чтобы получать тепло и согревать организм. В отличие от клеток белого жира, который запасает липиды, клетки бурого жира активно сжигают эти молекулы в своих многочисленных митохондриях. Авторы предположили, что при удлинении светового дня супрахиазматическое ядро неправильно регулирует работу бурого жира, и он сжигает не так много липидов, как мог бы. Чтобы подтвердить эту гипотезу, ученые проследили за мечеными молекулами липидов в организмах подопытных животных. Оказалось, что при удлинении светового дня бурый жир поглощает из крови меньше липидов. Чтобы проверить роль супрахиазматического ядра в этом процессе, ученые перерезали у подопытных животных нервные пути от этой части мозга к бурому жиру. После такой операции бурый жир стал поглощать в 5 раз меньше липидов из крови. Кроме того, в светлое время суток в буром жире уменьшалась экспрессия термогенина, а также уменьшалась активация фермента гормон-чувствительной липазы. В ходе исследования удалось доказать, что чем длиннее световой день, тем меньше липидов сжигает бурый жир и тем больше их запасает белый жир. Таким образом, длина светового дня влияет на темпы накопления жировых запасов.

В.В. Стрекопытов



Отучение от скрытых социальных предрассудков во сне

Unlearning implicit social biases during sleep. Xiaoqing Hu, James W. Antony, Jessica D. Creery, Iliana M. Vargas, Galen V. Bodenhausen, Ken A. Paller. Science. 2015. Vol. 348. No 6238. P. 1013–1015.

Процесс взаимодействия между людьми часто сопровождается множеством предрассудков. Предубеждения способны оказывать скрытое влияние на поведение человека на бессознательном уровне, вне зависимости от его намерений или попыток избежать проявления стереотипного мышления. Корректировка такого поведения осложняется рядом факторов. Демонстрация случаев, которые противоречат существующим стереотипам, является довольно эффективным методом борьбы с неосознанными предрассудками, но подобные эффекты обычно носят кратковременный характер. Учитывая роль сна в консолидации памяти, важно рассмотреть вопрос отучения от стереотипов, которое продол-

жает действовать во сне. В ходе исследования участникам (40 чел.) предъявлялась информация, которая не соответствовала их исходным искаженным установкам о лицах противоположного пола или другой расы. Предъявления для каждого из предрассудков сочетали с определенным звуком. В результате среди испытуемых выявлена тенденция мыслить менее предвзято сразу после обучающего процесса. Во время последующего короткого сна каждому участнику несколько раз включали один из звуков, чтобы вновь активировать процесс, отучающий от соответствующих стереотипных взглядов. Обнаружилось, что спад, выявленный ранее, усилился по сравнению со случаями, когда внешнее воздействие во сне не применялось. Сопоставимые результаты наблюдались у испытуемых на протяжении 1 недели после научения. Данные исследования показывают, что повторная стимуляция памяти во сне может благоприятно сказываться на отучении от скрытых предрассудков. Поддержание такого рода эффекта связано со сном.

С.А. Завалишина

Социальные науки

Отношение к идеологически отличным новостям и мнениям в Facebook

Exposure to ideologically diverse news and opinion on Facebook. Eytan Bakshy, Solomon Messing, Lada Adamic. *Science*. 2015. Vol. 348. No 6239. P. 1130–1132.

В течение многих лет политологи исследовали вопрос о влиянии социальных сетей на политические воззрения в обществе. Специалисты замечали, что регулярное чтение новостной ленты, к примеру, в Facebook, формирует такие взгляды у пользователей, что они становятся менее терпимыми к иным политическим течениям. Новостная лента устроена таким образом, что она подбирает посты, согласующиеся с интересами пользователя, и отфильтровывает все остальные. К примеру, новостные ленты либералов и консерваторов будут сильно отличаться друг от друга, в результате чего им будет сложнее понять взгляды друг друга. «Фильтрующим пузырем» специалисты называют персонализированное пользование Интернетом, которое создается благодаря работе различных алгоритмов, созданных технологическими компаниями. По большей части такая фильтрация довольно полезна, однако в некоторых случаях, к примеру, при проведении покупок в Сети, пользователи также получают разную информацию, которую им выдадут по результатам анализа их предыдущих запросов – данных, часто собранных без их согласия. Авторы исследования сосредоточились на проблеме политической поляризации и решили выяснить, какой вклад в это явление привнесли новостные ленты в социальных сетях. Просмотр «новостей» сегодня – не просто чтение новостей друзей и сообществ, изложенных в хронологическом порядке. Так, компания Facebook использует определенный алго-

ритм фильтрации, чтобы ранжировать эти сообщения, и чем больше человек пользуется социальной сетью, тем сильнее подстраивается под него этот персонализированный алгоритм. Данный алгоритм не только влияет на то, насколько интересно будет человеку листать новости в Facebook. Авторы утверждают, что представители различных политических воззрений – к примеру, либералы и консерваторы – редко узнают о проблемах, касающихся «противоположного лагеря», поскольку их запросы не указывают на заинтересованность в этом вопросе. Из-за этого политически ангажированные люди не узнают о темах и идеях друг друга, если не придерживаются схожих взглядов. Это приводит к политической поляризации. Авторы проводили свой эксперимент на взрослых американцах, которые заходят в Facebook по крайней мере 4 раза в неделю. В итоге ученые получили данные о 10 миллионах испытуемых, чьи политические взгляды разнесли по шкале от –2 (крайне консервативные) до +2 (крайне либеральные). Политическая направленность каждого поста в ленте новостей определялась политическими взглядами пользователя, который разместил этот пост на своей странице. Сравнивая две группы постов – одобренные и неодобренные алгоритмом релевантности – исследователи обнаружили, что Facebook действительно создает эффект эхо-камеры. Однако этот эффект далеко не столь существенный. Авторы утверждают, что «фильтрующий пузырь» снижает лишь на 1% вероятность попадания универсальных статей к пользователям тех или других политических взглядов. Наибольшее влияние на получаемую информацию имеют сами пользователи. Исследование показало, что люди сами склонны к замыканию в собственном информационном поле, а алгоритмы формирования ленты новостей Facebook лишь помогают им в этом.

В.В. Стрекопытов

Устойчивость и реактивность глобальной продовольственной безопасности

Resilience and reactivity of global food security. Samir Suweis, Joel A. Carr, Amos Maritan, Andrea Rinaldo, Paolo D’Odorico. *PNAS*. 2015. Vol. 112. No 22. P. 6902–6907.

Население Земли постоянно увеличивается. Все возрастающая потребность в продуктах питания приводит к интенсификации использования земельных и водных ресурсов планеты. Общая обеспокоенность по поводу связанных с этим экологических рисков, в совокупности с такими факторами, как повышенная чувствительность продовольственного рынка к изменениям природной среды и торговой политики, привели к тому, что проблема продовольственной безопасности сейчас активно обсуждается на международном уровне. Обобщив демографические данные с показателями производства и экспорта-импорта продовольственной продукции, авторы построили модель, описывающую взаимоотношения меж-

ду динамикой роста населения и доступностью продуктов питания в разрезе каждой отдельно взятой страны за последние 25 лет. В этот период растущий спрос на сельскохозяйственную продукцию сопровождался увеличением зависимости от международной торговли. Высокая доля импортных продуктов в структуре потребления отдельных стран стала фактором, обусловившим повышенную чувствительность глобального продовольственного рынка даже к локальным эпизодическим событиям, таким как запреты на экспорт, эпизодические возрастания цен на отдельные продукты и т.п. Модель позволяет оценить устойчивость и реактивность бинарной системы «население–продовольствие» и глобальной продовольственной безопасности в целом. Делается вывод о том, что за последние два десятилетия чувствительность системы к внешним воздействиям и ее общая нестабильность выросли. Также отмечается тот факт, что с принятием новых национальных или региональных энергетических и торговых стратегий возрастает угроза кризисов, в условиях которых глобальная продовольственная система теряет свою устойчивость.

В.В. Стрекопытов

Ориентированные на собственную выгоду посредники действуют как миротворцы, трансформируя конфликты и стимулируя кооперацию между сторонами

Selfish third parties act as peacemakers by transforming conflicts and promoting cooperation. Nir Halevy, Eliran Halali. PNAS. 2015. Vol. 112. No 22. P. 6937–6942.

Общественное мнение зачастую скептически настроено к идее посредничества при разрешении конфликтов. Чтобы разобраться, нужны ли посредники, авторы собрали несколько сотен студентов Стэнфорда и пользователей краудсорсинговой платформы Amazon Mechanical Turk и предложили им поиграть в несложные психологические игры. В ходе первого эксперимента студентов делили на группы по трое: двое спорщиков и посредник. Участники должны были выбирать геометрические фигуры: квадрат или треугольник. Если спорщики выбирали треугольник, каждый получал по 3 доллара (кооперация), если оба выбирали квадрат, сумма уменьшалась до 1 доллара (конфликт), если один выбирал квадрат, а второй треугольник, то первый получал 4 доллара, а второй – только 2 (односторонняя выгода). Посредник должен был угадывать, как поступят спорщики. Он мог просто наблюдать за ситуацией (за это он получал 2 доллара), а мог вмешаться, и в этом случае вознаграждение зависело от того, правильно ли он предсказал действия конфликтующих сторон. Как оказалось, сам факт того, что третья сторона может вмешаться в конфликт, повышал вероятность взаимовыгодного соглашения (то есть, выбора двух треугольников) с 72,4 до 92,9%. При этом только две трети посредников принимали решение вмешаться в конфликт. В ходе других

экспериментов правила игры для спорщиков оставались теми же, а вот для посредников условия изменились. В одном случае вмешательство в конфликт не приносило им прибыли, а то и вовсе могло стоить двух долларов, во втором – участие в споре всегда приносило два доллара – ровно столько же, сколько молчаливое созерцание. Наконец, в третьем случае помощь конфликтующим могла сделать вмешавшегося в спор богаче на целых четыре доллара. Гарантированное вознаграждение посредника в разрешении конфликта в 10 раз повышало вероятность того, что он вмешается в спор, по сравнению с ситуацией, когда миротворец с высокой вероятностью лишился денег (83,3 и 7,5% соответственно). Позитивное влияние посредника на ситуацию сохранялось, независимо от того, терял он деньги или нет: сама возможность, что кто-то может поучаствовать в разрешении спора, поднимала шансы на благополучный исход дела до 94,3%. Авторы назвали алгоритм своего исследования новой экспериментальной парадигмой «игра Миротворец», в которой два участника (спорщики) решают, что им лучше, – конкурировать или сотрудничать, а третий участник (посредник) решает, стоит ему вмешиваться в конфликт или нет. Основные результаты эксперимента можно обобщить в следующих положениях: 1) сама возможность включения в ситуацию посредника существенно увеличивает возможность кооперации, то есть того, что стороны договорятся самостоятельно; 2) при снижении рисков третьей стороны от вмешательства в конфликт вероятность того, что посредник подключится к переговорному процессу и будет действовать на общее благо, резко возрастает; 3) вероятность того, что спорщики договорятся самостоятельно всегда выше вероятности вмешательства в ситуацию посредника. Все эти выводы правомерны как для индивидуальных, так и для групповых конфликтов.

В.В. Стрекопытов



Технологии и материалы

Прогноз 10-координатных структур TiO_2 и SiO_2 при сверхвысоких давлениях

Prediction of 10-fold coordinated TiO_2 and SiO_2 structures at multimegabar pressures. Matthew J. Lyle, Chris J. Pickard, Richard J. Needs. PNAS. 2015. Vol. 112.No 22. P. 6898–6901.

Поведение TiO_2 при высоких давлениях имеет существенное значение для технологий и наук о Земле. Фазовые переходы TiO_2 вызываются приложенным внешним давлением. Аналогичные фазовые переходы происходят и в других веществах с формулой вида Ax_2 . В частности, плотность силикатов (SiO_2) при высоких давлениях значительно влияет на вязкость и процесс переноса вещества в толще мантии Земли, а также во внешних планетах Солнечной системы. Давление в центре этих планет может достигать 30 ТПа, что достаточно для деформации электронных оболочек. Фазовая устойчивость и свойства систем при крайне высоких давлениях — царство теории, хотя в недавних экспериментах достигнуты давления до 640 ГПа. Эксперименты с TiO_2 при высоком давлении показали, что с повышением давления TiO_2 переходит в новые

фазовые состояния. Недавно с помощью теории функции плотности предсказана новая фаза TiO_2 при давлениях около 50 ГПа, очень устойчивая с точки зрения термодинамики, хотя в экспериментах она до сих пор не наблюдалась. До недавнего времени считалось, что фазовое состояние TiO_2 , SiO_2 и некоторых других технически важных двуокисей при высоком давлении аналогично Fe_2 типа Р. Используя теорию функции плотности, были исследованы фазы TiO_2 с низкой внутренней энергией, и найдено, что наиболее стабильная форма TiO_2 при давлениях выше 650 ГПа имеет фазовое состояние с десятью координатами. Фазовые переходы в TiO_2 происходят при более низких давлениях, чем в SiO_2 . SiO_2 также принимает 10-координатное фазовое состояние при давлениях выше 10 ТПа. Как и в случае TiO_2 , фазовый переход SiO_2 сопровождается его металлизацией. Похоже, что полиморфная модификация SiO_2 при давлениях порядка 10^{12} Па является главным компонентом внешних планет Солнечной системы. Такое превращение при высоких давлениях происходит в недрах планет, удаленных от Солнца, что заставляет пересмотреть основные модели состояний этих планет.

И. Ю. Лещанский

Роботы, которые могут адаптироваться как животные

Robots that can adapt like animals. Antoine Cully, Jeff Clune, Danesh Tarapore, Jean-Baptiste Mouret. Nature. 2015. Vol. 521. No 7553. P. 503–507.

Роботизированные технологии коренным образом изменили многие отрасли промышленности. Робототехника стоит на службе обществу, участвуя в спасательных работах, медицинских операциях и транспортировке, а также везде, где надо заменить человека, — от морских глубин до далеких планет. Однако основным фактором, препятствующим использованию роботов в естественных условиях, за пределами специализированных предприятий, остается их хрупкость и подверженность поломкам. В статье сообщается о создании «разумного» робота, который умеет адаптировать свою «походку» для максимально быстрого и экономичного передвижения, вырабатывать эвристические стратегии решения незнакомых ему задач, а также самостоятельно анализировать характер повреждений своих конечностей. Травмированные животные не начинают обучаться движениям с нуля. Интуиция помогает им определить новые модели поведения и движения, испытать их на практике и, наконец, выбрать ту, которая работает, несмотря на травму. Именно такой бионический подход использовали авторы, создав целую серию роботов, способных к адаптации и своеобразной самопочинке, научив их предсказывать то, как изменится эффективность работы конечностей и суставов при отключении произвольных частей двигательного аппарата. Перед каждым включением робот выполняет на своем процессоре целый набор компьютерных симуляций, при помощи которых

он составляет карту эффективности всех возможных манер движения, в которых задействованы все или лишь часть его конечностей. При поломке он использует эту карту в качестве своеобразного «чувства интуиции», которое позволяет быстро выбирать наиболее эффективные стратегии перемещения в пространстве. Алгоритмы, управляющие выбором и проверкой этих стратегий, основаны на принципах теории эволюции Дарвина, утверждающей, что в природе выживают не сильнейшие, а самые приспособленные. Инженеры называют этот подход «разумным методом проб и ошибок». Кибернетический «самоанализ» требует в разы меньше вычислительных ресурсов, чем попытки предугадать все возможные сценарии развития событий и непредвиденные ситуации во внешнем мире, что позволяет роботу осуществлять такой анализ в режиме реального времени. К примеру, если у робота не получится идти на задних ногах, он попытается перейти к движению на передних, и быстро подберет оптимальную стратегию (например, стратегию ползания) за одну-две минуты. В качестве демонстрации работоспособности этих алгоритмов ученые создали двух роботов — шестиногого «паука» и «руку» с девятью суставами, которые продолжали двигаться и захватывать предметы даже при полной поломке двух из шести ног или половины моторов в суставах. Авторы заявляют, что эти же самые эволюционные алгоритмы можно использовать не только для борьбы с поломками, но и для изобретения стратегий преодоления неожиданных препятствий и новых тактик для исполнения сложных задач, которые ставят перед роботами инженеры. Подобная форма «разума» будет особенно неопределимой при отправке роботов на другие планеты, где в случае их поломки возможен только вариант самопочинки.

В.В. Стрекопытов

Макроскопическая суперсмазка при образовании графеновых наноавитков

Macroscale superlubricity enabled by graphene nanoscroll formation. Diana Berman, Sanket A. Deshmukh, Subramanian K.R.S. Subramanian, et al. Science. 2015. Vol. 348. No 6239. P. 1118–1122.

Макроскопические трение и износ являются основными каналами диссипации механической энергии в подвижных частях машин и механических устройств, результатом которых являются нежелательные потери материала и расход энергии. Примерно одна треть горючего, расходуемого в автомобилях, затрачивается на преодоление трения, а износ ограничивает долговечность механических компонентов. Поэтому даже умеренное уменьшение трения (на 20 %) может существенно снизить затраты энергии и вредные экологические эффекты. В связи с этим разработка эффективной суперсмазки, снижающей трение, является предметом активных исследований. В проведенных экспериментах изучалось скольжение шариков алмазоподобного углерода (diamondlike carbon, DLC) по поверхности различных материалов (никель, кремний, диоксид кремния), покрытых несколькими слоями графеновой пленки с примесью наноалмазных частиц. При этом удалось достичь рекордно-низкой величины коэффициента трения (0,004). Сила нагрузки изменялась от 0,5 до 3 Н, скорость скольжения — от 0,6 до 25 см/с, температура — от 20 до 50 °С. До сих пор супернизкое трение сухих поверхностей удавалось наблюдать только в некоторых экспериментах на атомно-гладких и идеальных кристаллических материалах: в случае поверхностей высокоориентированного пиролитического графита и многослойных углеродных нанотрубок.

Уменьшение трения этих поверхностей достигается за счет несоответственности структур, при которой граничные атомы одного тела не могут оказаться запертыми в потенциальном силовом поле другого тела. На поверхностях макроскопического размера эффект суперсмазки исчезает из-за наличия многочисленных структурных дефектов и деформаций. Первоначально авторы полагали, что низкое трение в случае, рассматриваемом в работе, также будет обеспечиваться за счет случайной комбинации углеродных связей типа sp^2/sp^3 между шариками DLC и поверхностью, благодаря которой контактирующие поверхности имеют несоответственную структуру. Но в сухих условиях измеренный коэффициент трения оказался равным 0,04 — слишком большим для эффекта суперсмазки. Это побудило авторов добавить в графен наноалмазную добавку. Частицы наноалмаза между поверхностями действуют как наноподшипники, принимая на себя давление, оказываемое на контактирующие поверхности. При скольжении поверхностей лоскуты графена сворачиваются вокруг алмазных наночастиц, что резко уменьшает площадь фактического контакта поверхностей и силу трения (на порядок величины). При этом несоответственность структур контактной пары сохраняется. При наличии атмосферы и влажности коэффициент трения выше почти на два порядка величины из-за образования большого числа частиц износа. Механизм сворачивания графеновых лоскутков вокруг наночастиц DLC подтвержден результатами атомистического моделирования, а также анализом состава частиц износа методами оптической, рамановской и просвечивающей электронной микроскопии. Таким образом, по мнению авторов, достижение сверхнизкого трения в макромасштабе является вполне реальным.

Г.В. Дедков

Оценка роли статических пространственных масштабов, ответственных за динамику стеклования в полидисперсных жестких дисках

Assessing the role of static length scales behind glassy dynamics in polydisperse hard disks. John Russo and Hajime Tanaka. PNAS. 2015. Vol.112. No 22. P. 6920–6924.

Природа динамического замедления процессов при стекловании является одной из фундаментальных нерешенных проблем физики конденсированного состояния. Важнейший вопрос касается роли структурного механизма при динамическом замедлении, т. е. возрастания статического порядка. Основываясь на теории случайных переходов первого рода, авторы предложили новый метод измерения длины статической корреляции аморфного упорядочения («point-to-set», PTS) и установили, что динамическая длина корреляции возрастает значительно быстрее, чем статическая длина. Имеется несколько физических концепций, предложенных для объяснения стеклования переохлажденных жидкостей, которые продолжают интенсивно обсуждаться. По одной из них стеклование является кинетическим явлением, по другой постулируется возрастание статического порядка или уменьшение конфигурационной энтропии. В рамках последней концепции существует два разных подхода. Один из них основывается на теории случайных фазовых переходов первого рода — конечном расширении моделей среднего поля с экспоненциально большим числом метастабильных фаз. Во втором подходе, недавно предложенном авторами, рост длины динамической корреляции ассоциируется с возрастанием длины статической

корреляции. В работе рассматриваются оба сценария, используя простую двумерную модель полидисперсных жестких дисков и метод Монте-Карло с алгоритмом Метрополиса. Исследуемая система состояла из $N = 10\,000$ дисков с полидисперсностью $\Delta = 11\%$ (величина Δ равна дисперсии гауссового распределения диаметров). При выбранной величине Δ гекстатическая фаза не образуется. При моделировании применялся алгоритм цепочки событий, обеспечивающий быстрое установление термодинамического равновесия даже при очень высокой плотности частиц. После установления равновесия активировалось поле пиннинга и включалась динамика Метрополиса, подпитываемая движениями случайно выбранных пар незакрепленных (nonpinned) частиц. Поле пиннинга определяет геометрию закрепления частиц в определенных позициях. При случайном пиннинге некоторое число частиц N_p выбирается случайным образом, после чего положение выбранных частиц не изменяется при последующем моделировании. Величина поля пиннинга определяется концентрацией закрепляемых частиц c . Рассматривались значения $c = 0,01, 0,06, 0,1, 0,15$ и $0,2$ и для каждого из них находилось среднее значение поля пиннинга. Корреляционные длины нескольких типов находились с учетом всех геометрических конфигураций. В результате удалось оценить величину статической корреляционной длины (PTS). Результаты подтвердили тот факт, что шкала длин корреляций, связанная с образованием ориентированных связей, возрастает быстрее, чем шкала длин парных корреляций, что согласуется со значительной ролью статического структурного порядка при стекловании. Большой интерес для будущих исследований представляет установление связи степенной зависимости корреляционной длины от времени релаксации с различиями в динамике стеклования.

Г.В. Дедков

Влияние трехпространственных разветвлений наночастиц на модуль Юнга в нанокompозитах: эффект интерфейсной ориентации

Influence of three-dimensional nanoparticle branching on the Young's modulus of nanocomposites: Effect of interface orientation. Shilpa N. Raja, Andrew C. K. Olson, Aditya Limaye, Kari Thorkelsson, Andrew Luong, Liwei Lin, Robert O. Ritchie, Ting Xu, A. Paul Alivisatos. PNAS. 2015. Vol. 112. No 21. P. 6533–6538.

В связи с доступностью наночастиц с контролируемым размером и формой, возобновился интерес к механическим свойствам смесей типа полимер–наночастица. Однако, несмотря на большое количество теоретических исследований, эффект разветвления наполнителей с размерами порядка 10 нм на композитных материалах с упругой жесткостью получил пока малое освещение. Экспериментальным путем был изучен модуль Юнга у нанокompозитов, созданных из основных блок-сополимеров, смешанных в заряженных волокнах и тонких пленках, в одном случае с линейными наностержнями, а в другом — с квантовыми точками в

форме тетрапода. В работе была использована феноменологическая решетчато-пружинная модель, которая должна была наглядно продемонстрировать изменение модуля Юнга в зависимости от формы наполнителя. Результаты исследований с помощью решетчато-пружинной модели оказались вполне сопоставимы с экспериментальными данными, как для стержней, так и для тетраподов. Наилучшим образом в ходе исследований проявили себя смеси композитов с квантовыми точками — тетраподами. Показатели улучшения модуля упругости в таких соединениях в 1,5 раза превышают показатели по идентичным композитам, содержащим наностержни. Неожиданно важной для оптимизации механических свойств нанокompозитов оказались ориентация ковалентных связей X-типа в интерфейсах наночастица–лиганд и ориентация нанонаполнителей. То есть, тетраподы так хорошо проявили себя в экспериментальных исследованиях именно благодаря их трехпространственному разветвлению формы. В случае же нанокompозитов с неорганическими наполнителями такого ранее не наблюдалось. Результаты исследований задают направление для будущих исследований в области разработки новых нанокompозитов.

В.В. Стрекопытов

Пленки сплава, обладающие памятью формы с ультранизкой усталостью

Ultralow-fatigue shape memory alloy films. Christoph Chluba, Wenwei Ge, Rodrigo Lima de Miranda, Julian Strobel, Lorenz Kientle, Eckhard Quandt, Manfred Wuttig. Science. 2015. Vol. 348. No 6238. P. 1004–1007.

Материалы с памятью формы, а в особенности металлические сплавы, имеют массу потенциальных применений. Однако общая проблема всех сплавов с памятью формы — низкая износостойкость, после определенного числа применений они теряют свою способность восстанавливать первоначальную форму. В частности, материалы с памятью формы, используемые в малоинвазивной хирургии, способны выполнить свою задачу максимум 3-5 раз. В статье приводится описание нового материала — сплава Ni, Ti и Cu, который может деформироваться и вновь обретать прежнюю форму до 10 млн раз. Авторы разработали особый метод кристаллизации нового сплава, который и стал ключом к ре-

шению проблемы износостойкости. У нового сплава атомы расположены таким образом, что они могут переключаться между двумя различными конфигурациями множество раз. Саму же деформацию можно вызвать различными способами, например, воздействуя на материал теплом или сообщая ему электрическое напряжение. За «сглаживание» процесса переключения между фазами отвечают частицы микропримеси Ti_2Cu , которые полностью совместимы с обеими кристаллическими структурами. В ходе эксперимента сплав изготавливался в небольших камерах площадью 1 см^2 и толщиной менее 1 мм. Образцы испытывали под воздействием тепла и механической деформации в общей сложности 10 млн раз. Всего испытания заняли несколько недель. Изменения в структуре сплава исследовались при помощи мощных микроскопов и рентгеновских установок. Помимо медицины и хирургии, новый сплав может найти применение в бытовой технике и в авиационной промышленности, к примеру, для изготовления управляющих поверхностей самолета.

В.В. Стрекопытов

Еженедельный журнал Российской ассоциации содействия науке

НАУКА В мире

www.naukavmire.ru