

НАУКА **в мире**

Обзор журналов
Nature, PNAS, Science

Номер 24 (2)
31 марта 2015 года

In Advance: Удаленное обнаружение
внеземной жизни по поверхностным
биоиндикаторам на экзопланетах

стр. 9

Новосибирские ученые создали новый
материал на основе наноалмазов

стр. 7

Из-за изменения климата
деревья Амазонии
умирают молодыми

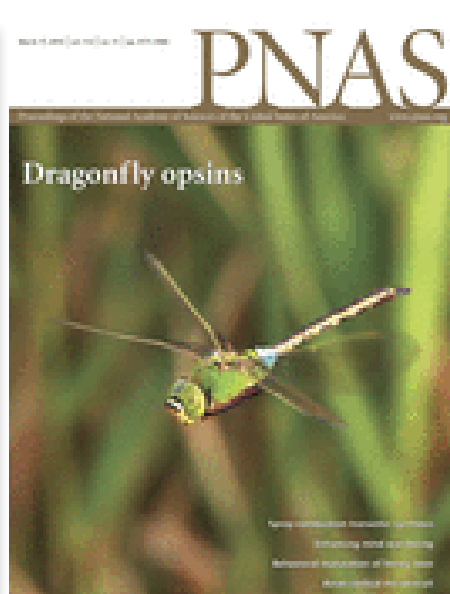
стр. 21

Окситоцин делает
организм невосприимчивым
к алкоголю

стр. 32

Изобретен быстрый
метод 3D-печати

стр. 48



ЖУРНАЛ «НАУКА В МИРЕ» № 24 (2)

31 марта 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

Редакторы

Ирина Александровна БАННОВА

Редакторы-референты

Братцева А. Л., Ваганова А. Н. Галимова Д. Р.,
Дедков Г. В., Завалишина С. А., Зворыкина С. В.,
Карпов Н. В., Колесникова Н. Ю., Лещанский И. Ю.,
Мохосоев И. М., Перфильева С. Ю., Сварник О. Е.,
Стрекопытов В. В., Степанова Е. М., Тиунова А. А.,
Якименко А. В., Ястребов С. 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.

Читайте в этом номере:

Информационное поле

4 От редакции

Самое интересное в рефератах

Топ-10 статей текущего номера

7 Новости • В России

Российские учёные внесли вклад в развитие
квантовой криптографии

Новосибирские ученые создали новый
материал на основе наноалмазов

8 Новости • За рубежом

Астрофизики открыли новые свойства темной материи

Биологи нашли бактерии со встроенным
аккумулятором электроэнергии

9 In Advance

Ранний крокодилморф – крупнейший хищник
в период зарождения динозавров

10

Удаленное обнаружение внеземной жизни
по поверхностным биоиндикаторам на экзопланетах

Перепрограммирование филадельфийской хромосомы
человека превращает В-клетки острой лимфобластической
лейкемии в нелейкемические макрофаги

11

Одна тысяча генов, без которых вы можете прожить

Nature · PNAS · Science: рефераты статей

13 Астрономия

15 Физика

18 Науки о Земле и экология

22 Антропология и история

25 Биология

37 Медицина

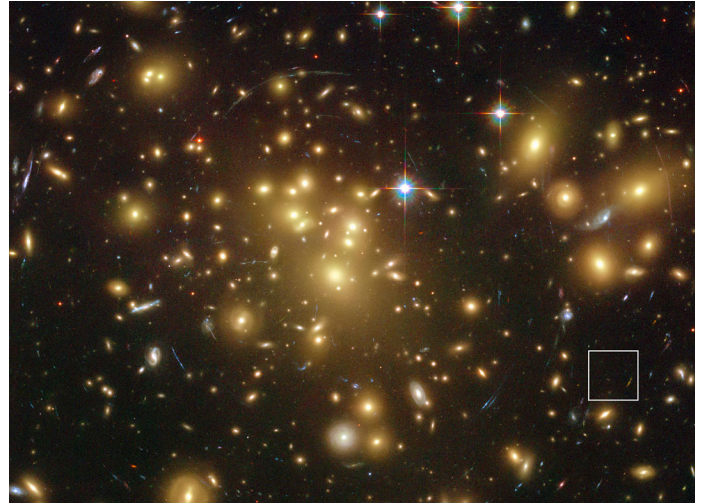
41 Нейронауки и психология

45 Технологии и материалы

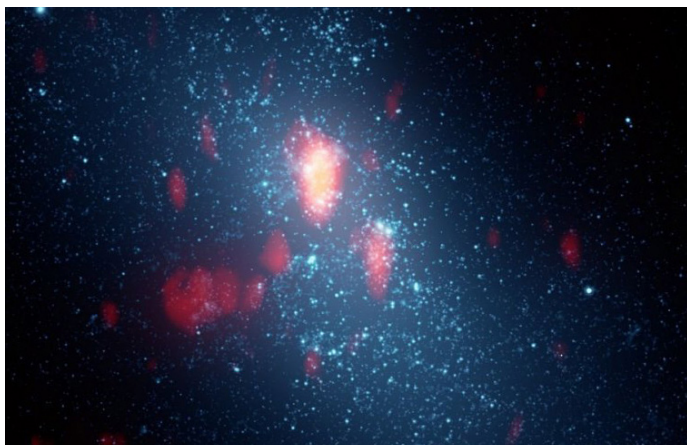
Самое интересное в рефератах

Топ-10 статей текущего номера

1. Астрономы нашли далекую галактику, в которой нет звезд. Астрономы обнаружили в созвездии Девы удаленную молодую галактику под названием A1689-zD1, которая развивалась очень быстро. Расстояние, на которое она удалена от нашей звездной системы, позволяет ученым заявлять: эта галактика настолько молода, что в ней еще не начался процесс формирования звезд и планет — пока это просто облако частиц. На самом деле, наблюдения показывают далекое прошлое — такой эта галактика была миллионы лет назад, а свет от нее только сейчас достиг Земли. Обнаружение галактики A1689-zD1 позволяет исследователям получить новые данные о том, как формируются и развиваются скопления, подобные нашему Млечному Пути. Галактика осталась для ученых загадкой, поскольку формирование объектов в ней происходило очень быстро и заняло не более 500 миллионов лет, хотя обычно для этого требуются миллиарды лет. *Реферат на с. 13.*



Галактика A1689-zD1 на снимке космического телескопа «Хаббл» / ESO/D. Watson



Газовое облако D галактики NGC 525, в котором скрыто гигантское звездное скопление, окруженное толстым слоем газа и пыли / Jean Turner

2. Астрономы нашли миллион звезд, формирующихся в соседней галактике. Соседняя с нами галактика NGC 5253 в созвездии Центавра переживает мощнейшую вспышку звездообразования, в результате которой в ней одновременно формируются в горячем, богатом пылью облаке молекулярных газов, около миллиона новых светил. Суммарная светимость всех звезд скопления превышает светимость нашего Солнца в миллиарды раз, однако разглядеть скопление в обычный оптический телескоп невозможно, так как оно скрыто от наблюдений массами раскаленных газов. Количество пыли, окружающей эти звезды, поражает воображение: в скоплении находится масса пыли, эквивалентная примерно 15000 солнечных масс. Практически вся эта пыль состоит из углерода и кислорода. Возраст обнаруженного звездного скопления составляет порядка 3 млн лет, и по астрономическим меркам это скопление считается необычно молодым. *С. 14.*

3. Почему морские раковины сложены арагонитом, а не кальцитом. Разные формы карбоната кальция при одном и том же химическом составе обладают разной структурой и различаются свойствами (например, растворимостью). Уже столетие ученые ломают голову над вопросом, почему минералы морских раковин принимают две химически идентичные, но все же разные формы. Обычно при кристаллизации карбоната кальция образуется кальцит. В морской же воде формируется арагонит. На результат влияет множество природных факторов. Главный — соотношение в воде Ca и Mg. Оно влияет на поверхностную энергию зарождающегося кристалла и при достижении определенного порога определяет, что получится в итоге — кальцит или арагонит. Кальцит — стабильная форма, а арагонит — метастабильная, и это значит, что со временем или под воздействием определенных факторов он может трансформироваться в стабильную форму. *С. 20.*



Кальцит и арагонит / Felice Frankel

4. Из-за изменения климата деревья Амазонии умирают молодыми. Международный коллектив ученых изучил развитие лесов бассейна Амазонки за последние тридцать лет и пришел к выводу, что деревья перерабатывают меньше углекислого газа, чем раньше. Выяснилось, что появление здесь новых деревьев шло примерно с одной и той же скоростью, а вот количество погибших деревьев резко увеличилось. Ученые предполагают, что общее увеличение двуокиси углерода в атмосфере способствует ускоренному росту деревьев. Но этот, казалось бы, обнадеживающий факт, означает, что деревья, которые растут быстрее, и умирают раньше. В результате, леса Амазонки могут потерять часть своей способности перерабатывать углекислый газ. *С. 21.*



Влажные леса Амазонии / Yann Arthus Bertrand

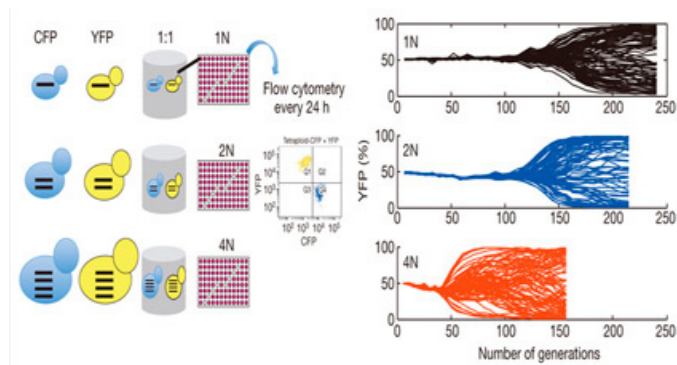


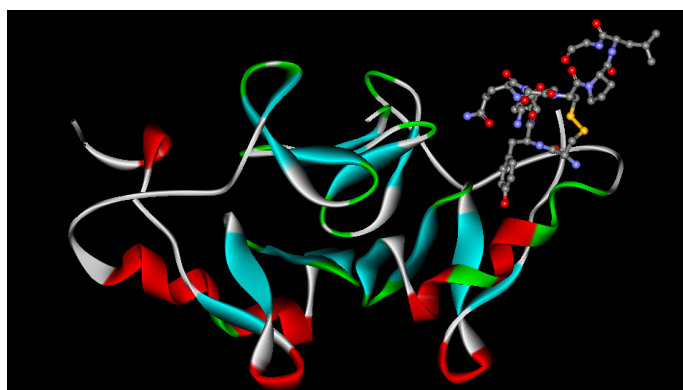
Схема эксперимента. Гаплоидные, диплоидные и тетраплоидные дрожжи изображены в виде овалов с одной, двумя и четырьмя черными полосками / Anna M. Selmecki, et al.

5. Полиплоидия ускоряет эволюцию. Эволюционный эксперимент, проведенный американскими биологами, показал, что тетраплоидные дрожжи (с четырьмя хромосомными наборами, 4N) приспосабливаются к неблагоприятным условиям быстрее, чем диплоидные (2N) и гаплоидные (1N). Повышенная скорость адаптации тетраплоидов обеспечивается, с одной стороны, большей частотой возникновения полезных мутаций, с другой — тем, что одна и та же мутация нередко оказывается более полезной для тетраплоидов, чем для диплоидов и гаплоидов. В частности, приобретение дополнительных копий хромосом или их утрата часто повышает приспособленность тетраплоидов, в то время как диплоидам и гаплоидам такое же изменение не идет на пользу. По-видимому, наличие дополнительных копий генома в каждой клетке снимает часть ограничений, сдерживающих адаптивную эволюцию, и предоставляет больше свободы для эволюционного поиска. *С. 26.*

6. Быстрое изменение поведения пчел при стрессе ускоряет коллапс медоносных колоний. Резкое сокращение популяций медоносных пчел стало уже глобальной проблемой. Авторы исследования попытались выяснить, какие именно реакционные механизмы включаются у пчел в ответ на стресс и почему при неблагоприятных условиях так быстро вымирает вся взрослая популяция колоний. Для этого изучалась социальная динамика пчел в период, непосредственно предшествующий коллапсу. Выяснилось, что если колония пчел погружена в кризис, то коллективное поведение насекомых выражается в отправке на сбор пищи самых молодых и неопытных особей, которые быстро погибают. *С. 27.*



Медоносная пчела *Apis mellifera carnica* / Wikipedia Commons



Окситоцин / Wikipedia Commons

7. Окситоцин делает организм невосприимчивым к алкоголю. Выяснилось, что окситоцин, «гормон любви и семейного счастья», очень эффективно защищает клетки мозга от действия этилового спирта и заметно снижает желание выпить, что позволит в будущем использовать его для устранения последствий употребления спиртного и лечения алкоголизма. Ученые исследовали влияние окситоцина на крыс. Оказалось, что инъекции этого гормона в больших дозах делают животных невосприимчивыми к спиртному. Возможно, это связано с блокирующим эффектом, который окситоцин оказывает на рецепторы ГАМК (гамма-аминомасляной кислоты) — одни из основных тормозных медиаторов в нервной системе хордовых. *С. 32.*



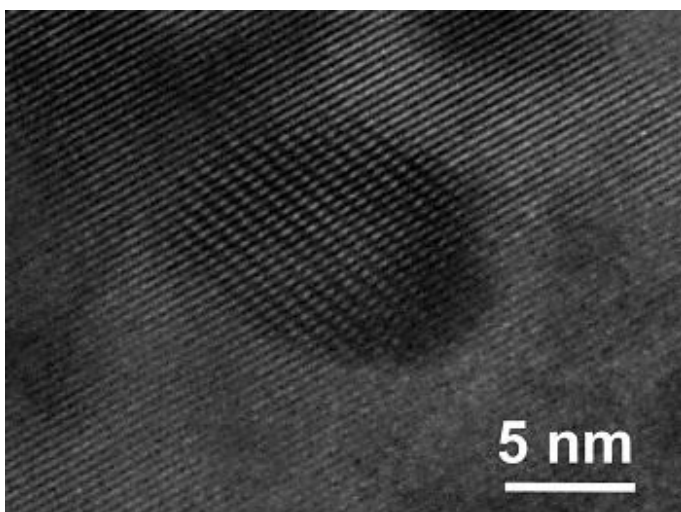
Североамериканский красногорлый анолис (*Anolis carolinensis*) / Manuel Battafarano

8. Отоакустическая эмиссия людей такая же, как у животных. Обычно звуковые волны генерируют лишь здоровые уши, что допускает клиническое использование отоакустической эмиссии, например, для мониторинга слуха новорожденных. Однако биофизические принципы, лежащие в основе звуковой генерации, недостаточно хорошо изучены, что ограничивает их потенциальное применение. Для исследования животных, генерирующих отоакустическую эмиссию, американские ученые выбрали сипух и североамериканских красногорлых анолисов. Исследователи сравнили измеренные звуки с человеческими данными и установили, что происхождение эмиссии связано с теми же биомеханическими принципами, несмотря на поразительные различия в анатомии уха. С. 33.

9. Калифорнская компания изобрела быстрый метод 3D-печати. Обычно технология 3D-печати представляет собой послойную печать выбранного образца. Исследователи из калифорнийской компании Carbon 3D создали принципиально новый тип 3D-печати, при которой используется не механический метод печати, а новый фотохимический метод, получивший название CLIP (Continuous Liquid Interface Production), который основан на принципе фотополимеризации. На исходный материал — светочувствительный полимер — воздействуют кислородом и ультрафиолетом. Новый метод позволяет существенно ускорить процесс печати и создавать сложные трехмерные объекты со скоростью, превышающей в 25–100 раз скорость обычной 3D-печати. С. 48.



Объекты, изготовленные новым методом 3D-печати / Carbon 3D



Структура нового термоэлектрика / Weishu Liu, et. al.

10. Открыт самый эффективный материал для преобразования тепловой энергии. Новый термоэлектрический материал, синтезированный в Хьюстонском университете, предназначен для получения электричества из тепла, например, теряемого в выхлопных трубах автомобилей. Авторы открытия утверждают, что полученное ими соединение — легированный германием станид магния ($Mg_2Sn_{0,75}Ge_{0,25}$) — справляется с такой задачей лучше всех известных материалов. При этом низкая стоимость сырья, порядка 190\$ за кг, делает новый материал коммерчески рентабельным. Помимо использования тепловых потерь энергии термоэлектрик может применяться для преобразования концентрированного солнечного излучения, так как способен выдерживать температуры более 400 °C. С. 47.

Новости • В России

Российские учёные внесли вклад в развитие квантовой криптографии

Группа учёных — преподавателей базовой кафедры квантовой оптики и телекоммуникаций Московского института электроники и математики (МИЭМ) НИУ ВШЭ разработала и протестировала систему, которая на порядок увеличивает дальность действия квантово-криптографических систем

Почти у всех классических систем криптографии есть одна «ахиллесова пята» — ключ к шифру, без которого принимающая сторона не сможет прочесть послание. Даже не сам ключ, а проблема его передачи от отправителя адресату, ведь ни один способ доставки не гарантирует полной сохранности: нарочного с депешей можно перехватить, электронные си-

стемы взломать, разговор подслушать. Здесь как раз и приходит на помощь квантовая криптография — метод защиты информации, основанный на принципах квантовой физики.

«Мы передаем информацию посредством одиночных фотонов. Один фотон — один бит информации. Определенная поляризация фотона, определяет ноль это или единица, — пояснил профессор базовой кафедры квантовой оптики и телекоммуникаций МИЭМ НИУ ВШЭ, генеральный директор компании «Сконтел» Константин Смирнов. — Секретность информации, передаваемой с помощью фотонов, защищена не просто математикой, а фундаментальными физическими законами».

Один из них — «теорема о запрете клонирования», согласно которой невозможно создать идеальную копию неизвестного квантового состояния. А принцип неопределенности Гейзенберга утверждает, что нельзя измерить один параметр фотона, не исказив другой. Взяв за основу эти явления, можно создать систему связи, которая всегда обнаружит «подслушивание».

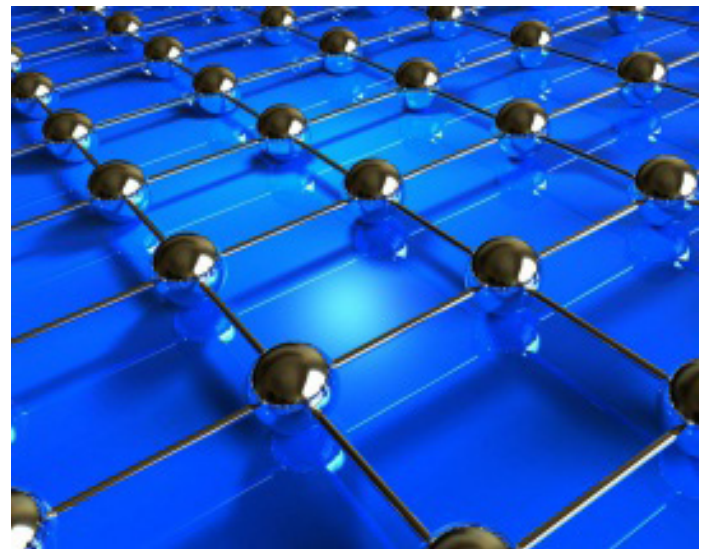
По материалам opec.ru, strf.ru

Новосибирские ученые создали новый материал на основе наноалмазов

Совместными усилиями специалистов Новосибирского Института неорганической химии (ИНХ) СО РАН и ученых из красноярского Института биофизики СО РАН был разработан новейший композитный материал, который светится в слабом электрическом поле

Эксперты института биофизики отмечают, что структура созданного ими материала состоит из определенного количества графеновых нанотрубок, вверху каждой из которых расположен наноалмаз. Новый композитный материал обладает рядом интереснейших свойств. Оказывается, что в слабом электрическом поле полученный материал люминесцирует красивым голубым светом, что дает возможность говорить об использовании полученных материалов в качестве микроскопических светильников.

Сотрудник ИНХ СО РАН Юлия Федосеева пояснила, что ученым удалось получить относительно простой и дешевый способ получения люминесцентного материала, который можно применять в различных отраслях. Среди сфер применения медицина, в ней новейший материал можно использовать как один из элементов диагностического зонда. Материал имеет возможность применения и в электронике,



Материал при попадании в электрическое поле начинает светиться / vestifinance.ru

как один из компонентов для создания дисплеев нового поколения. В дальнейшем планируется доработка технологии для увеличения интенсивности свечения наноалмазов. При доработке наноалмазы могут создать конкуренцию люминесцентным материалам, при сохранении простоты изготовления.

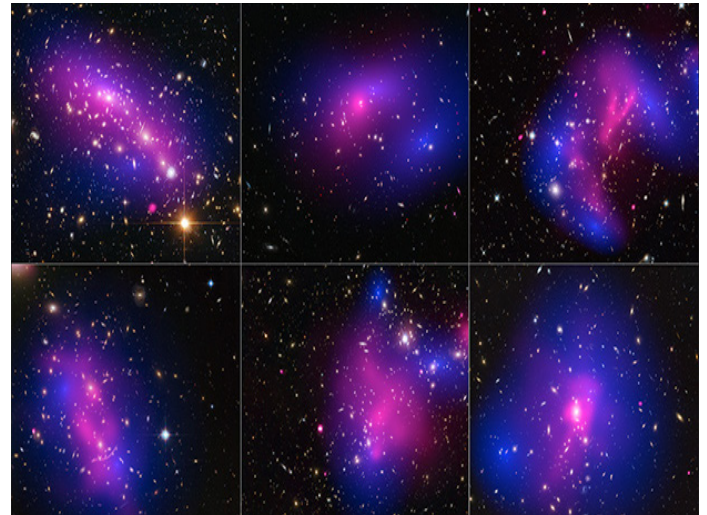
По материалам ИНХ СО РАН

Новости • За рубежом

Астрофизики открыли новые свойства темной материи

Астрофизики из Швейцарии и Великобритании сообщили о новых неожиданных свойствах темной материи. В своих наблюдениях ученые заметили, что она взаимодействует сама с собой значительно меньше, чем считалось ранее

Результаты своих исследований авторы опубликовали в журнале *Science*, а кратко с ними можно ознакомиться на сайте НАСА. На темную материю приходится около 85 процентов материи (или примерно 24 процента общей энергии-массы Вселенной). Непосредственно ее наблюдать пока не удается, однако она оказывает влияние на движения галактик (в частности, с ней связан эффект гравитационного линзирования), что и позволяет астрономам говорить о ее существовании. Ученые исследовали 72 столкновения скоплений галактик — одних из самых крупных структур во Вселенной. В этом астрофизикам помогали космические телескопы Hubble, позволяющие проводить наблюдения в видимом свете, и Chandra, следящий за галактиками в рентгеновском диапазоне. Скопления галактик включают в себя три основных компонента: собственно звездные системы, газовые облака и темную материю. При столкновении скоплений газовые облака меняют направления и скорости своего движения. Галактики значительно реже меняют свою структуру из-за больших расстояний между ними и высоких скоростей,



Изображения столкновений скоплений галактик: синий цвет отвечает снимкам Hubble в оптическом диапазоне, а розовый — обсерватории Chandra в рентгеновском / NASA and ESA

с которыми они движутся. Оказалось, что при таких масштабных столкновениях темная материя почти никак не меняла своего движения. Это означает, что она чрезвычайно слабо взаимодействует сама с собой. Ученые отмечают, что их работа позволяет создать новые перспективные теоретические модели для объяснения поведения темной материи и отбросить неактуальные.

По материалам NASA, *Science*, 27 марта 2015 г.

Биологи нашли бактерии со встроенным аккумулятором электроэнергии

Два вида бактерий оказались способными вступать в необычный тип симбиоза, в ходе которого они обмениваются заряженными и разряженными «био-батареями» на базе кристаллов магнетита

Биологи выяснили, что два очень необычных штамма микробов научились запасать энергию крайне непривычным способом для живых организмов — они выращивают в себе микроскопические кристаллы магнетита и «накачивают» их электронами, таким образом превращая их в биобатареи, которыми пользуются другие бактерии, говорится в статье, опубликованной в журнале *Science*. Капплер и его коллеги открыли новый вид «электрических» бактерий и нашли своеобразные биоаккумуляторы внутри них, изучая образцы микробов, живущих в почве и грунтовой воде. Наблюдая за их жизнью в светлое и темное время суток, им удалось раскрыть пример крайне необычного и своеобразного сотрудничества между двумя видами микробов, *Rhodospseudomonas palustris* и *Geobacter sulfurreducens*. Второй вид бактерий хорошо известен биологам из-за их необычных свойств: они питаются окислами железа и углеводородами, а также способны притя-

гиваться к металлическим поверхностям и частицам. Некоторые ученые предлагают использовать особо прожорливые штаммы *Geobacter sulfurreducens* в «живой батарее» — бактерии будут окислять активное вещество в топливных ячейках и передавать освободившиеся электроны в электрическую цепь. Как обнаружили Капплер и его коллеги, когда в среде с ними появляются менее известные бактерии *Rhodospseudomonas palustris*, возникает интересный круговорот веществ. В темное время суток *Geobacter sulfurreducens* поедает растворенные в воде ионы железа и восстанавливают их, понижая степень окисления с +3 до +2, выбрасывая полученные «отходы» в виде частиц магнетита. В свою очередь, днем *Rhodospseudomonas palustris* поглощают восстановленное железо и повторно окисляют его, используя подобные кристаллы в качестве своеобразных «батареек». Подобный симбиоз и круговорот соединений железа позволяет микробам практически бесконечно пользоваться ими, расходуя только органику, воду, углекислоту и другие распространенные в природе вещества в процессе жизнедеятельности.

Подобные сообщества микробов, помимо очистки вод от тяжелых металлов и прочих загрязнителей, в принципе можно использовать и для более сложных задач — снабжения электроэнергией различных наноприборов и прочих устройств. Однако для этого потребуются еще месяцы, если не годы исследований, заключают ученые.

По материалам *Science*, РИА Новости

In Advance

Nature Advance • Палеонтология

Ранний крокодиломорф – крупнейший хищник в период зарождения динозавров

Early crocodylomorph increases top tier predator diversity during rise of dinosaurs. Lindsay E. Zanno, Susan Drymala, Sterling J. Nesbitt, Vincent P. Schneider. Nature. 2015. Scientific reports. Published ahead of print March 19, 2015.

Триасовый период был особой эпохой в эволюционной истории хищников. Катастрофическое вымирание многих животных видов на границе перми и триаса открыло для них новые возможности развития. Закончился этот период в ранней юре установлением безраздельного господства динозавров. Ключевой группой триасовых хищников были крокодиломорфы (Crocodylomorpha) — крупнейшие из когда-либо живущих рептилий и единственные из двух линий архазавров, дожившие до наших дней. Однако считалось, что в начале триасового периода крокодиломорфы были еще небольшими наземными плотоядными, не игравшими существенной роли среди хищников. Тем неожиданнее была находка огромной сухопутной рептилии надотряда Crocodylomorpha, которой дали имя *Carnufex carolinensis*. Палеонтологи из университета Северной Каролины восстановили часть черепа, позвоночника и верхних передних конечностей карнифекса из ископаемых останков, найденных в формации Пекин (Pekin Formation) возраста 231 млн лет (карнийский ярус триасового периода) в округе Чатем, штат Северная Каролина (США). *C. carolinensis* при жизни достигал 2,7 м в длину и 1,52 м в высоту и передвигался на задних лапах. Он обладал длинной челюстью с десятком острых, как лезвия, зубов, приспособленных срезать мясо с костей жертвы. Тонкий вытянутый череп животного (около 50 см в длину) сохранился лишь частично, так что трудно было представить, как при жизни выглядела голова рептилии.

Чтобы получить более полное представление о черепе *C. carolinensis*, исследователи провели сканирование отдельных костей с применением новейших технологий визуализации, в том числе поверхностного сканирования высокого разрешения. Чтобы восстановить недостающие части, ученые опирались на данные о черепах ближайших родственников гигантского крокодиломорфа. Как уверяют авторы статьи, это существо было самым страшным хищником на территории тогдашнего материка Пангея. Когда триасовый период подошел к концу, вымирание уничтожило этих хищников — выжили лишь миниатюрные крокодиломорфы и тероподы. Открытие *Carnufex carolinensis*, как считают ученые, поможет разобраться в том, как и почему большая часть фауны триасового периода вымерла, таким образом, расчистив дорогу тогдашним еще относительно некрупным динозаврам, а также поможет понять, как развивались ранние родственники крокодилов.



Реконструкция прижизненного облика *Carnufex carolinensis* / Jorge Gonzales

Удаленное обнаружение внеземной жизни по поверхностным биоиндикаторам на экзопланетах

Surface biosignatures of exo-Earths: Remote detection of extraterrestrial life. Siddharth Hegde, Ivan G. Paulino-Lima, Ryan Kent, Lisa Kaltenegger, Lynn Rothschild. PNAS 2015; published ahead of print March 16, 2015, doi:10.1073/pnas.1421237112.

Американские и немецкие астрономы разработали базу данных световых спектров микроорганизмов, которая, как они надеются, сможет помочь ученым найти жизнь на других планетах. В ходе работы была составлена картотека из 137 видов бактерий, где для каждого вида указаны его основные биологические особенности, а также приведены фотографии и данные спектрального анализа. Ученые попытались представить, как выглядели бы земные микробы из космоса на расстоянии, соответствующем нескольким сотням световых лет. На сегодняшний день ученые достигли большого прогресса в поиске экзопланет (планет, расположенных за пределами Солнечной системы), в том числе таких, которые по своим характеристикам похожи на Землю — имеют каменистую поверхность и воду. При этом остается непонятным, есть ли на них жизнь. В случае, если поверхность планеты покрыта слоем бактерий, как было на Земле в течение почти 460 млн лет, то при помощи спектрального анализа излучения планеты и разработанного каталога можно понять, на какие земные микроорганизмы больше всего похожи обитатели той или иной экзопланеты. В работе были проанализированы как широко распространенные земные микроорганизмы, так и те, что живут в экстремальных условиях, например, на Крайнем Севере. Оказалось, что каждый микроорганизм имеет свой собственный спектр



Иллюстрация: vesti.ru

и цвет, поэтому по этим данным можно определить, какой микроорганизм обитает в той или иной среде. Следует отметить, что на сегодняшний день не найдено ни одной планеты с излучением хотя бы отдаленно напоминающим излучение земных бактерий. Однако ученые не теряют надежды и говорят, что, если жизнь и существует за пределами Земли, то она, скорее всего, представляет собой не гигантские разумные существа, а колонии микроорганизмов. Новая база данных дает людям больше шансов приблизиться к ответу на вопрос о присутствии жизни за пределами нашей планеты. Из-за разнообразия форм земной жизни данная теория не работает в отношении Земли. Однако вполне вероятно, что в других мирах доминирует какая-то одна форма жизни, а новая база позволит по цвету планеты определить, какая именно. База данных находится в открытом доступе.

Перепрограммирование филадельфийской хромосомы человека превращает В-клетки острой лимфобластической лейкемии в нелейкемические макрофаги

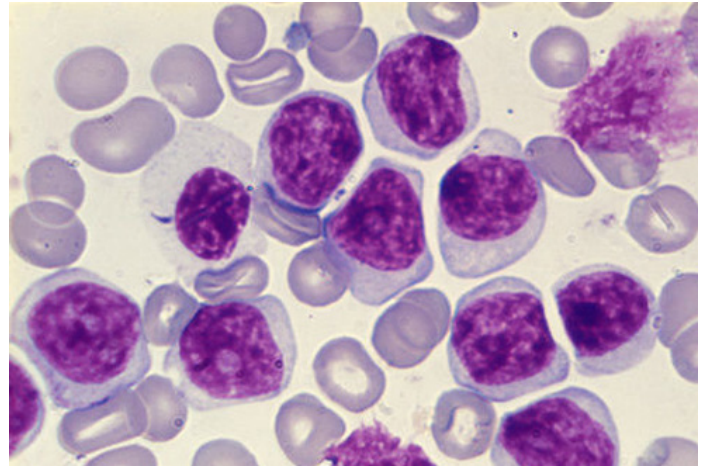
Reprogramming of primary human Philadelphia chromosome-positive B cell acute lymphoblastic leukemia cells into nonleukemic macrophages. James Scott McClellan, Christopher Dove, Andrew J. Gentles, Christine E. Ryan, Ravindra Majeti. PNAS 2015; published ahead of print March 16, 2015, doi:10.1073/pnas.1413383112.

Исследователям из Стэнфордской медицинской школы (США) впервые удалось разработать метод превращения больных клеток-лимфобластов, вызывающих лейкемию, в иммунные клетки-макрофаги. Более того, такие клетки-макрофаги сами начинают бороться с лейкемией с удвоенной силой. В норме лимфобласты являются незрелыми белыми кровяными клетками — лимфоцитами. Однако

при острой лимфобластической лейкемии (ALL) эти клетки «застревают» в незрелом состоянии и снижают количество в крови красных кровяных телец — эритроцитов, что и приводит к лейкемии. Острая лимфобластическая лейкемия обычно развивается у детей в возрасте от 2 до 5 лет и в 20% случаев в течение пяти лет приводит к летальному исходу. В данном случае трансформировать

удалось В-клетки лимфобластической лейкемии (B-ALL), ответственные за 85% всех случаев ALL. Сделать открытие, как это нередко бывает, помог случай: медики из Стэнфорда выращивали культуры клеток B-ALL в лабораторных чашках Петри, чтобы тестировать разные методы борьбы с ними. При этом было замечено, что больные лимфобласты в культуре иногда изменяют свою форму и размер, становясь похожими на клетки иммунной системы — макрофаги (Т-клетки), которые как раз и отвечают в нашем организме за уничтожение больных клеток, включая раковые. При ближайшем рассмотрении выяснилось, что больные лимфобласты действительно превращаются в макрофаги. Используя наработки, ранее полученные в экспериментах с клетками мышей, ученые научились управлять процессом такой трансформации. Для этого в среду, в которой содержатся B-ALL, добавляют специальные белки, которые «переключают» у них работу некоторых генов. Оказалось, что полученные таким образом макрофаги борются со своими бывшими собратьями, больными лимфобластами, с удвоенной силой. Поскольку они сами возникли из раковых клеток, они разделяют с ними общие химические сигналы, что позволяет макро-

фагам легко идентифицировать раковые клетки и делает иммунную атаку эффективнее. Теперь ученые поставили перед собой следующую цель: разработать лекарство, которое будет превращать лейкемические клетки в иммунные непосредственно в организме пациента.



Лейкемические лимфобластные клетки крови / BONHOMME,ISM/ SCIENCE PHOTO LIBRARY

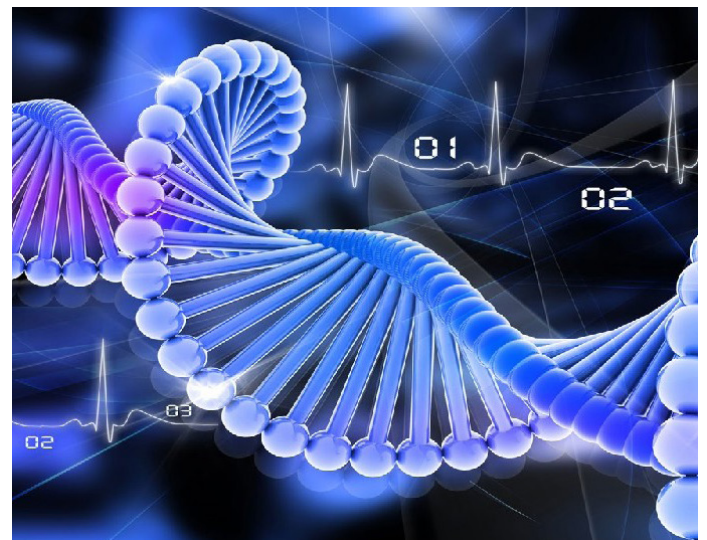
Science Advances • Генетика

Одна тысяча генов, без которых вы можете прожить

One thousand genes you could live without. Jocelyn Kaiser. Science Advances. Published Online March 25, 2015. Science DOI: 10.1126/science.1261768

Масштабный проект, осуществленный частной компанией deCODE (Исландия), позволил выделить генетические риски и предрасположенность к заболеваниям, исследовать суть человеческой эволюции, а также выявить более тысячи генов, без которых можно обойтись. Подобные исследования являются свидетельством значительного прорыва в области генетики. Еще пять лет назад сделать это не представлялось возможным. Теперь благодаря появлению доступных методов секвенирования генома ученые получили возможность выявить последовательность цепочки генов 2636 исландцев и проверить их на предмет редко встречающихся мутаций. На сегодняшний день, в основном путем сравнения маркеров расположенных в геноме здоровых и больных людей, уже выявлен ряд генов, обычно вызывающих шизофрению, рак, диабет и ряд других опасных заболеваний. Компания нашла несколько новых генетических нарушений, включая мутации в гене ABCA7, которые в два раза повышают риск появления болезни Альцгеймера у людей европейского происхождения. Ученые локализовали мутации, но пока не знают, какие из них связаны с высокой степенью риска. Неожиданным открытием оказалось то, что некоторые люди являются носителями нефункциональных копий одного из примерно 20 тыс. генов. Их клетки не вырабатывают белки этих генов. Исследование таких людей может пролить свет на функции многих генов и помочь разрабо-

тать лекарственные препараты, если отсутствующий ген защищал от некоторых болезней. Компания deCODE нашла более 8 тыс. исландцев, в геноме которых отсутствует 1171 ген. Многие из них, скорее всего, лишние, несущественные фрагменты ДНК, которые не определяют здоровье человека. Известно, что 3% отсутствующих генов отвечали за различие некоторых запахов, которые были важны для древнего человека, но не нужны нам. Остальные гены представляют интерес, в том числе пара генов, которая ответственна, как предполагают ученые, за развитие слуха. Сейчас компания призывает людей принять участие в дальнейших клинических исследованиях, которые помогли бы ученым прояснить функции отсутствующих генов.

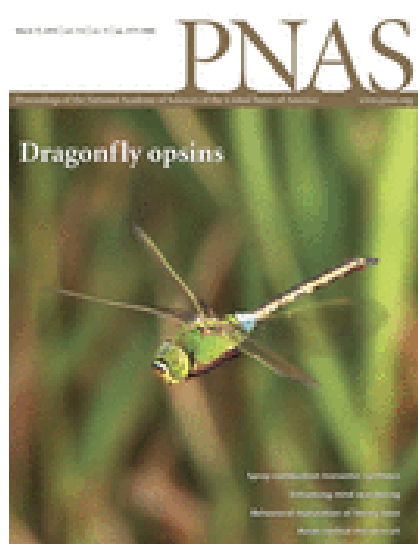


Молекула ДНК / depositphotos.com

Vol. 519. No 7543
19 марта 2015 года



Vol. 112. No 11
17 марта 2015 года



Vol. 347. No 6228
20 марта 2015 года



Nature · PNAS · Science: рефераты статей

13 **Астрономия**

15 **Физика**

18 **Науки о Земле и экология**

22 **Антропология и история**

25 **Биология**

37 **Медицина**

41 **Нейронауки и психология**

45 **Технологии и материалы**

Астрономия

Пыльная нормальная галактика эпохи реионизации

A dusty, normal galaxy in the epoch of reionization. Darach Watson, Lise Christensen, Kirsten Kraiberg Knudsen, Johan Richard, Anna Gallazzi, Michał Jerzy Michałowski. Nature. 2015. Vol. 519. No 7543. P. 327–330.

Изучая созвездие Девы, авторы обнаружили необычный объект – A1689-zD1, который одновременно обладал чертами современных и древних галактик. Благодаря соседнему с ним скоплению галактик Abell 1689, одному из крупнейших галактических семейств и мощной гравитационной линзе, свет A1689-zD1 был усилен в 9 раз, что позволило ученым подробно изучить его структуру и свойства. Оказалось, что A1689-zD1 является типично современной галактикой по своему внешнему облику и физическим свойствам: в ней очень много пыли и звезд. Частота звездообразования в ней относительно невысока – около 12 солнечных масс в год. Кроме того, звезды в ней молодые, их средний возраст не

превышает 80 млн лет. Удивительным является большое количество пыли, что обычно служит признаком взрывов древних звезд. Галактика A1689-zD1 относится к числу одних из самых молодых образований такого типа, от Большого взрыва ее отделяет всего 700 млн лет. В это время Вселенная вступила в эпоху реионизации, когда начали образовываться первые звезды. Поэтому ожидалось, что A1689-zD1 состоит лишь из водорода и гелия, так как для появления более тяжелых элементов, согласно существующей теории, требуется, чтобы произошли взрывы сверхновых и сменилось много поколений звезд. Однако в реальности авторы зафиксировали в A1689-zD1 большое количество металлов и такое же соотношение пыли и газа, как в нашем Млечном пути. Чтобы накопить такое количество пыли, галактика должна была приступить к формированию звезд очень рано, примерно через 560 млн лет после Большого взрыва. Согласно альтернативной версии, эволюция галактики A1689-zD1 началась позже, но протекала быстрее.

В.В. Стрекопытов

Ключевая роль поверхностных магнитных полей в солнечном динамо

The crucial role of the surface magnetic fields for the solar dynamo. Robert Cameron and Manfred Schussler. Science. 2015. Vol. 347. No 6228. P. 1333–1335.

Солнечные пятна и множество других явлений, происходящих на Солнце в течение 11-летнего цикла активности, являются следствием появления магнитных полей на его поверхности. Основная концепция формирования солнечного динамо включает цикл, в течение которого полоидальное и тороидальное поле взаимно генерируют друг друга. Закручивание полоидального поля дифференциальным вращением создает тороидальное поле. Обращение направления полоидального поля происходит при образовании магнитных петель в тороидальном поле, которые закручиваются силой Кориолиса из-за вращения Солнца. В свою очередь, обращенное полоидальное поле становится источником обращенного тороидального поля. В этой схеме 11-летний цикл солнечной активности связан с 22-летним циклом изменения полярности магнитного поля. Еще в 1919 г. было обнаружено, что ориентация магнитного поля в восточных и западных участках биполярных групп солнечных пятен (в одной полусфере) остается постоянной в течение 11-летнего цикла и противоположна полярности в другой полусфере. Отсюда следует, что группы пятен генерируются тороидальным полем одинаковой полярности в течение одного цикла. Нарушение этого правила редко наблюдается. Из этого следует вывод о том, что именно чистая тороидальная компонента солнечной полусферы, определяемая при азимутальном усредне-

нии, ответственна за образование групп пятен. Применяя простой подход, основанный на теореме Стокса о циркуляции магнитного поля, авторы показали, что тороидальное поле, генерируемое дифференциальным вращением Солнца, определяются возникающими поверхностными полями. Для сравнения с наблюдениями использовались синоптические магнитограммы распределения магнитного поля на поверхности Солнца, начиная с 1975 г. (данные обсерватории Kitt-Peak). Временная эволюция чистого тороидального поля в конвективной зоне может быть рассчитана по наблюдаемым распределениям поля и дифференциальным скоростям вращения. Использовалось азимутально-усредненное уравнение магнитной гидродинамики для индукции магнитного поля \mathbf{V} в полярных координатах: $\partial \mathbf{V} / \partial t = \nabla \times (\mathbf{U} \times \mathbf{V} + \langle \mathbf{u} \times \mathbf{V} \rangle - \eta \nabla \times \mathbf{V})$, где $\mathbf{V}(r, \theta)$ и $\mathbf{U}(r, \theta)$ – усредненные по азимутальному углу θ магнитное поле и скорость плазмы, η – коэффициент магнитной диффузии, угловые скобки означают азимутальное усреднение. Контур интегрирования проходил в верхней части меридионального сечения Солнца и включал четыре участка: радиальный сегмент в экваториальной плоскости, две дуги по 90° , проходившие по поверхности диска Солнца и под конвективной зоной, и участок вдоль оси вращения. Рассчитанные временные зависимости магнитного потока на поверхности хорошо согласуются с наблюдаемыми. Результаты показывают, что доминирующим источником тороидального поля является дипольное поле вблизи полярных областей, которое достигает максимальных значений вблизи минимумов солнечной активности. Хотя эта корреляция не идеальная, она обеспечивает наилучший способ предсказания силы следующего солнечного цикла.

Г. В. Дедков

Высокоэффективное звездообразование в галактике NGC 5253, обусловленное стримерами аккрецирующего газа

Highly efficient star formation in NGC 5253 possibly from stream-fed accretion. J. L. Turner, S. C. Beck, D. J. Benford, S. M. Consiglio, P. T. P. Ho, A. Kovacs, D. S. Meier, and J.-H. Zhao. Nature. 2015. Vol. 519. No 7543. P. 331–333.

В настоящее время эффективность звездообразования в газовых облаках галактик невелика. Соответствующий параметр определяется соотношением $\eta = M_s / (M_{\text{gas}} + M_s)$, где M_s — масса звезд, а M_{gas} — масса газа. Низкая величина параметра η отражает возраст галактик и является критическим параметром в их эволюции. Этим объясняется тот факт, что в звездных скоплениях звездообразование прекращается, после чего звезды начинают рассеиваться и уходят в галактические диски (балджи). Однако наличие возрастных звездных кластеров, в которых звезды все еще связаны гравитационными силами глобулярных кластеров, в Млечном Пути, показывает, что эффективность звездообразования была значительно выше в раннюю эпоху — около 10 млрд лет назад. В галактике NGC 5253, принадлежащей к местной группе галактик, наблюдается молодой звездный кластер, представляющий необычный пример интенсивного звездообразования. В данной работе сообщается об исследованиях излучения, исходящего из зоны локализации этого кластера при вращательном переходе $J=3 \rightarrow 2$ молекул CO. Газовое облако является очень горячим, плотным, неподвижным, и содержит много пыли. Отношение массы газа и пыли ниже, чем в самой галактике NGC 5253, что связывается с подпиткой пылевой компоненты со стороны звездного скопления, «вморо-

женного» в облако. Параметр η в данном случае превышает 50%, что в 10 раз выше, чем в облаках Млечного Пути. NGC 5253 является двойной сфероидальной галактикой в скоплении Gen A/M83 с массой звезд около $1,5 \times 10^8 M_\odot$ (M_\odot — масса Солнца). Общая масса с учетом темной материи оценивается величиной на порядок выше. Расстояние от Солнца составляет 3,8 Мпс. В проекции на небесную сферу NGC 5253 близка к галактике M83, находящейся на расстоянии 4,8 Мпс, но вряд ли связана с ней генетически, хотя наблюдаемые стримеры облаков CO из гало NGC 5253 показывают, что в прошлой эволюции NGC 5253 какое-то столкновение имело место. Наблюдения выполнялись в 2011 г. на радиоинтерферометре Submillimeter Array (SMA) (Гавайские острова), включающем 8 радиотелескопов с диаметром 6 м. Рабочая частота составляла $\nu_0 = 340,323$ ГГц, но изучались также 48 прилегающих участков спектра с шириной по 4 МГц. Переходу $J=3 \rightarrow 2$ CO соответствует частота 345,79599 ГГц. Уровень энергии $J=3$ молекулы CO возбуждается при температуре 33 К, при которой проявляется различие между холодными облаками и облаками, в которых начинается интенсивное звездообразование. Использовались также данные наблюдения излучения в континууме на длине волны 350 мкм, выполненные в обсерватории КАЛТЕХ'а в 1999 г. Оценка величины потока массы вещества, подпитывающей стримеры в области скопления, составляет 0,1–0,2 $M_\odot/\text{год}$. Величина η определялась из динамических соображений, основанных на теореме вириала. Полная величина массы в стримерах составляет $2 \times 10^6 M_\odot$, а протяженность — 200–300 пс. По мнению авторов, в NGC 5253 реализуется новый режим эффективного звездообразования, инициируемый холодной стримерной аккрецией.

Г. В. Дедков

Физика

Волна плотности хиральности фазы «скрытого порядка» в URu_2Si_2

Chirality density wave of the “hidden order” phase in URu_2Si_2 . H.-H. Kung, R. E. Baumbach, E. D. Bauer, V. K. Thorsmølle, W.-L. Zhang, K. Haule, J. A. Mydosh, G. Blumberg. Science. 2015. Vol. 347. No 6228. P. 1139–1342.

Фазовые переходы в физических системах связаны с появлением параметра порядка и спонтанным нарушением симметрии. Параметр порядка описывает состояние с нарушенной симметрией и отражает микроскопическое взаимодействие между электронами твердого тела в кристаллическом потенциале решетки. Магнитные и сверхпроводящие низкотемпературные состояния являются примерами фаз, характеризующихся параметрами порядка, обусловленных взаимодействием «тяжелых» электронов (тяжелых фермионов) атомных орбиталей 5f. Сверхпроводник URu_2Si_2 имеет фазу «скрытого порядка» (ФСП) при температуре менее 17,5 К. Симметрия и микроскопический механизм образования параметра порядка в этом случае неизвестны, несмотря на многочисленные попытки теоретического объяснения, которые предпринимались в течение последних 30 лет. Авторам данной работы удалось экспериментально определить симметрию низкоэнергетических возбуждений URu_2Si_2 при температурах выше и ниже температуры ФСП, используя метод рамановской поляризационной спектроскопии (РПС). URu_2Si_2 кристаллизуется в тетрагональной объемно-центрированной структуре с точечной группой симметрии D_{4h} и пространственной группой $134/mmm$. При температуре $T_{ФСП} = 17,5$ К в URu_2Si_2 наблюдается немагнитный фазовый пере-

ход второго рода в электронно-упорядоченное состояние, а при температурах ниже 1,5 К – переход в сверхпроводящее состояние. Уникальность свойств этого соединения связана с сосуществованием широких зон проводимости, образованных р-электронами атомов Si, и d-электронами атомов U, а также сильно локализованных электронных орбиталей U-5f, находящихся в смешанном тетравалентном $5f^2$ и тривалентном $5f^3$ состоянии. При рамановском рассеянии с контролируемой поляризацией падающих и рассеянных фотонов происходит возбуждение электронных состояний с определенной симметрией. Метод РПС позволяет разделить спектры возбуждений в соответствии с различными представлениями группы D_{4h} и, таким образом, классифицировать их симметрию. Температурная эволюция возбуждений при переходе через точку фазового перехода $T_{ФСП}$ позволяет однозначно идентифицировать нарушение симметрии. Поскольку интенсивность зондирующего излучения мала, она не оказывает существенного влияния на систему. В экспериментах использовался свет с линейной и круговой поляризацией. Измерялись зависимости рамановской восприимчивости в каналах рассеяния с разной симметрией от рамановского частотного сдвига и температуры, а также зависимости интенсивности от частотного сдвига. Установлено, что «скрытый порядок» фазы при $T < T_{ФСП}$ связан с возникновением соразмерной с решеткой волны плотности хиральности. Параметр скрытого порядка нарушает вертикальную и диагональную симметрию отражения для электронных состояний, локализованных на узлах урана, в результате чего в кристаллическом потенциале решетки возникают локальные состояния с различными хиральными свойствами.

Г. В. Дедков

Вторые законы квантовой термодинамики

The second laws of quantum thermodynamics. Fernando Brandão, Michał Horodecki, Nelly Ng, Jonathan Oppenheim, and Stephanie Wehner. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3275–3279.

Второй закон термодинамики накладывает ограничения на изменение состояний. Это относится к системам из многих частиц, но известно, что можно сформулировать термодинамические законы и для малого количества частиц. Есть ли для такого режима Второй закон термодинамики? Обнаружено, что для приблизительно циклического процесса Второй закон термодинамики для микроскопических систем принимает форму, отличную от макроскопической, накладывая на изменение состояний системы не одно ограничение, а целый их набор. Обнаружено целое семейство свободных энергий, обобщающих классическую. Показано, что они никогда

не возрастают. Обычный Второй закон относится к одной из них, остальные же накладывают дополнительные ограничения на термодинамические переходы. Обнаружено три режима, определяющих, какой именно набор Вторых законов управляет переходами состояний в зависимости от того, насколько процесс циклический. В частности, показано, что в одном из таких режимов можно вызвать очевидное нарушение классического Второго закона термодинамики. Эти Вторые законы актуальны для малых систем, но могут быть применимы и к отдельным большим системам при условии дальних взаимодействий таких систем. Полученные таким образом законы термодинамики объединены в единую структуру с помощью точного определения тепловых операций. Первый закон в такой системе определяет класс операций, нулевой закон обнаруживается, как отношение эквивалентности между тепловыми состояниями. Остальные законы отвечают за монотонность обобщенных свободных энергий.

А.В. Якименко

Динамический фазовый переход в открытой модели Дикке

Dynamical phase transition in the open Dicke model. Jens Klinder, Hans Keßler, Matthias Wolke, Ludwig Mathey, and Andreas Hemmerich. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3290–3295.

Неравновесные явления в многочастичных квантовых системах до настоящего времени изучены недостаточно. Это, в частности, относится к открытым системам, связанным с внешним резервуаром. Модель Дикке (МД), предложенная более полувека назад для описания квантовой физики многих частиц, описывает сценарий взаимодействия N двухуровневых атомов с синфазным радиационным электромагнитным полем. В работе выполнена экспериментальная имитация МД с использованием бозе-эйнштейновского конденсата (БЭК) в оптическом резонаторе с высокой добротностью и ультраузкой шириной полосы. Известно, что при изменении константы связи с резервуаром МД описывает квантовый фазовый переход второго рода между однородной фазой, в которой каждый атом независимо взаимодействует с радиационной модой, и коллективной фазой, в которой все атомные диполи образуют макроскопический дипольный момент. Уже давно ожидалось, что критические свойства МД с внешней накачкой могут проявляться в нелинейном гистерезисном поведении в динамических экспериментах. Особенности МД для атомных систем в резонаторах с наличием диссипации являются предметом интенсивных теоретических исследований. Существенную роль имеет сужение полосы резонатора до величины порядка однофотонной энергии отдачи. Временной интервал диссипации внутреннего электромагнитного поля и когерентной атомной динамики близки между

собой, поэтому оказывается возможно наблюдать систему в неадиабатическом режиме, в отсутствие равновесия атомов с полем. В описываемом эксперименте БЭК атомов ^{137}Rb в форме сигары позиционировался в резонаторе таким образом, что его длинная ось была направлена вдоль оси продольной оптической моды резонатора. Атомы в поле стоячей волны ориентировались перпендикулярно оси. Частота накачки ω_p достаточно далеко смещена от частоты атомного резонанса, так что взаимодействие с атомами является дисперсионным и не приводит к спонтанному излучению. Резонатор имел сверхнизкое затухание с константой $\kappa = 2\pi \times 4,45 \pm 0,05$ кГц, что ниже удвоенной энергии отдачи атомов $2\omega_R = 2\pi \times 7,1$ кГц. При наличии N атомов в резонаторе резонансная частота ω_0 моды TEM_{00} сдвигалась на величину $\delta = 0,5N\Delta$, где $\Delta = 2\pi \times 0,36 \pm 0,04$ кГц – экспериментально измеренный сдвиг частоты одного фотона. Для $N = 10^5$ атомов и $\delta = 4\kappa$ резонатор работает в режиме сильной кооперативной связи. При $\delta = \omega_p - \omega_0 - \delta < 0$ атомы выстраивались в поле, создаваемом стоячей волной резонатора и внешней волной накачки, интенсивность которой регулировалась. Экспериментально измерялась зависимость числа фотонов (интенсивности света) от величины расстройки частоты накачки, а также временные зависимости интенсивности. Наблюдался гистерезис при переходе от однородной к коллективной фазе БЭК со степенной зависимостью от времени затухания. Результаты измерений хорошо согласуются с расчетами в приближении среднего поля на основе гамильтониана МД. Полученные результаты углубляют понимание неравновесной физики в открытой многочастичной системе с бесконечным радиусом взаимодействия.

Г. В. Дедков

Мультиволновые ахроматические метаповерхности с фазовой компенсацией рассеяния

Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation. Francesco Aieta, Mikhail Kats, Patrice Genevet, Federico Capasso. Science. 2015. Vol. 347. No 6228. P. 1342–1345.

Преломляющие (дисперсионные) и дифракционные оптические компоненты оптических систем преобразуют световые лучи принципиально различным образом. Преломляющие линзы из материалов с нормальной дисперсией имеют большую величину фокусного расстояния для красных лучей, а призмы, соответственно, преломляют лучи света с большей длиной волны на меньшие углы. Для дифракционных линз и решеток картина прохождения света прямо противоположная. И в том и в другом случае оптические системы характеризуются сильной хроматической aberrацией – различной фокусировкой и разбросом фаз лучей, имеющих разную длину волны. Ахроматические пластинки и линзы позволяют устранить этот недостаток, однако до сих пор не удавалось получить метаповерхности с высокой степенью компенсации хроматизма. В данной работе разработан новый практический метод устранения ограничений рефракционной и дифракционной оптики, связанных с хроматической aberrацией, и показано, что с помощью специально спроектированной метаповерхности можно создать необходимые фазовые сдвиги между лучами с различной длиной волны. По сравнению с другими методами устранения хроматической aberrации метаповерхности характеризуются плотной упаковкой резонаторов и малой толщиной, что делает их изготовление высокотехнологичным. Функциональные характе-

ристики метаповерхности для конкретного вида оптической системы должны обеспечивать конструктивную интерференцию лучей с разной длиной волны λ , т. е. одинаковый фазовый сдвиг $\varphi_{\text{tot}}(r, \lambda)$ (где r – координата точки метаповерхности). Его можно представить в виде суммы $\varphi_{\text{tot}}(r, \lambda) = \varphi_m(r, \lambda) + \varphi_p(r, \lambda)$, где φ_m – фазовый сдвиг при прохождении метаповерхности, а φ_p – фазовый сдвиг, приобретаемый при прохождении в свободном пространстве. Постоянство величины $\varphi_{\text{tot}}(r, \lambda)$ обеспечивается вкладом $\varphi_m(r, \lambda) = -2\pi l(r)/\lambda$, где функция $l(r)$ несет информацию о функциональном типе прибора (линза, дефлектор лучей и т. д.). В данном эксперименте базовыми элементами ахроматической метаповерхности планарной линзы служили спаренные диэлектрические резонаторы субволнового размера. Они имели форму прямоугольных островков кремния на подложке SiO_2 с фиксированной высотой $t = 400$ нм, и регулируемой шириной w_1, w_2 , и взаимным расстоянием g . Общая длина системы из 240 резонаторов составляла 240 мкм. Каждый резонатор имел свои параметры w_1, w_2, g , так что в целом вся система была апериодической, в отличие от градиентных метаповерхностей, использовавшихся в работах других авторов. Сконструированная планарная линза имела низкий коэффициент поглощения (вариации интенсивности не превышали 13%) и отклоняла лазерные лучи с длиной волны 1,1, 1,55 и 1,8 мкм на угол 17° при нормальном падении первичного пучка. Имеется также возможность улучшения характеристик метаповерхности, используя результаты моделирования методом конечных элементов. Предполагается, что системы такого типа найдут широкое применение в легких световых коллиматорах для дисплеев, а также в оптических системах с коррекцией хроматизма.

Г. В. Дедков

Нестабильность Кельвина-Гельмгольца в сверхтонкой воздушной пленке вызывает разбрызгивание капель на гладких поверхностях

Kelvin-Helmholtz instability in an ultrathin air film causes drop splashing on smooth surfaces. Yuan Liu, Peng Tan, and Lei Xu. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3280-3284.

При соударении быстро движущейся капли с гладкой поверхностью на кромке распространяющегося вдоль поверхности листа жидкости возникает разбрызгивание. Учет этого явления важен во многих приложениях, например в сельском хозяйстве, струйной печати, нанесении поверхностных покрытий, охлаждении разбрызгиванием. Несмотря на большое количество исследований за прошедшее столетие, этот распространенный феномен не имеет фундаментального объяснения. Было проведено экспериментальное исследование соударения капель с подложкой,

в частности с помощью субстратов, позволяющих избирательно удалять воздух из места соударения, либо из-под расширяющегося фронта жидкости. Комбинация эксперимента с математическим моделированием позволила показать, что расплескивание вызывает сверхтонкий слой воздуха, захваченный под распространяющимся фронтом жидкости. Толщина этого слоя оказывается меньше средней длины свободного пробега молекул воздуха. В связи с этим, внутренний поток воздуха переносит импульс с необычно большой скоростью, сравнимой со скоростью звука. Давления, производимые этим воздушным потоком в 10 раз выше, чем в обычно встречающихся ситуациях. Такие большие значения вызывают на малых масштабах длины неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, фактически приводя к наблюдаемому эффекту разбрызгивания. Наблюдается численное согласие предложенной математической модели с экспериментальными данными. Таким образом, предложенная модель дает базовое понимание распространенного феномена разбрызгивания капель на гладких поверхностях.

А. В. Якименко

Отсутствующий валентный переход в плутониевом сверхпроводнике

Avoided valence transition in a plutonium superconductor. B. J. Ramshaw, Arkady Shekhter, Ross D. McDonald, Jon B. Betts, J. N. Mitchell, P. H. Tobash, C. H. Mielke, E. D. Bauer, and Albert Migliori. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3285-3289.

В коррелированных металлах электроны d и f часто не полностью локализованы у ядер, но и не полностью свободны. Эта двойственность связанного/свободного состояния электронов является основой коррелированных электронных состояний в купратных сверхпроводниках с высокой температурой сверхпроводящего перехода T_c и в интерметаллидах с тяжелыми фермионами. Наиболее явным образом это свойство выражено для валентных электронов плутония. Описан полный набор симметрично-разрешенных модулей упругости PuCoGa_5 , сверхпроводника с тяжелыми фермионами, имеющего самую высокую тем-

пературу сверхпроводящего перехода $T_c = 18,5$ К. Найдено, что объемный модуль упругости аномально смягчается на большом диапазоне температур, превышающих T_c . При этом обнаруживается связь наблюдаемого смягчения с флуктуациями состояний плутония со смешанной валентностью. Эти флуктуации валентности исчезают, когда при достижении температуры T_c открывается сверхпроводящий зазор, что позволяет предположить важную роль электронов вблизи поверхности Ферми в физике состояния со смешанной валентностью. Также можно предположить, что при возникновении сверхпроводящего состояния в PuCoGa_5 не происходит валентного перехода. Отсутствие магнетизма в PuCoGa_5 затрудняло обобщение на него модели, работающей для большинства других сверхпроводников с тяжелыми фермионами, где магнитные флуктуации считаются источником сверхпроводимости. Полученные результаты позволяют предположить, что для необычно высокой T_c в PuCoGa_5 критически важны валентные флуктуации.

А. В. Якименко

Науки о Земле и экология

Эмпирические измерения влияния концентраций CO₂ на тепловое излучение поверхности Земли в период 2000–2010 гг.

Observational determination of surface radiative forcing by CO₂ from 2000 to 2010. D. R. Feldman, W. D. Collins, P. J. Gero, M. S. Torn, E. J. Mlawer, T. R. Shippert. Nature. 2015. Vol. 519. No 7543. P. 339–343.

Влияние CO₂ и других парниковых газов на глобальный климат (парниковый эффект) обычно оценивается как разница теплового излучения Земли (длинноволновой радиации) в доиндустриальную эпоху и в наши дни. Авторам впервые удалось количественно оценить способность атмосферного углекислого газа поглощать инфракрасное излучение земной поверхности. Измерения проводились в двух разных штатах США (Оклахома и Аляска) в течение 11 лет с помощью высокоточных спектрометров в рамках программы ARM (Atmospheric Radiation Measurement) министерства энергетики США. Такие инструменты способны

выявить уникальный спектральный рисунок, связанный именно с диоксидом углерода. По результатам измерений, с 2000 г. по 2010 г. концентрации CO₂ в атмосфере выросли на 22 ppm. Большая часть этого углекислого газа – результат сгорания ископаемого топлива по всему миру. За этот же период зафиксировано снижение интенсивности длинноволнового излучения в системе Земля–атмосфера примерно на 0,2 ± 0,07 Вт/м², что соответствует 10%-му тренду усиления парникового эффекта. Для сравнения, палеоклиматические модели теплового переноса дают значение для доиндустриального периода (1750 г.), равное 1,82 ± 0,19 Вт/м². Таким образом, впервые удалось инструментальными методами доказать теоретическое положение о влиянии диоксида углерода на усиление парникового эффекта. В рамках данного исследования впервые эмпирически подтверждены теоретические выкладки о влиянии парникового эффекта, связанного с антропогенными выбросами CO₂ и других газов, на энергетический баланс поверхности Земли.

В. В. Стрекопытов

Истончение и отступление шельфовых ледников Антарктики за счет айсбергообразования связаны с влиянием океана

Ocean-driven thinning enhances iceberg calving and retreat of Antarctic ice shelves. Yan Liu, John C. Moore, Xiao Cheng, Rupert M. Gladstone, Jeremy N. Bassis, Hongxing Liu, Jiahong Wen, Fengming Hui. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3263–3268.

Уровень Мирового океана сильно зависит от гляциодинамического режима ледниковых покровов приполярных областей. Плавающие части антарктического покрова (шельфовые ледники) являются важнейшими элементами ледниковой динамики, так как они удерживают наземные ледники Антарктиды от стекания в сторону океана. Несмотря на то, что шельфовые ледники играют ключевую роль в балансе масс ледового континента, никогда раньше не проводились прямые измерения их параметров. При помощи спутниковых снимков, авторы исследования впервые измерили не только параметры всех айсбергов размером более 1 км², откалывающихся от антарктического ледникового щита, но и оценили «состояние здоровья» всех шельфовых ледников, используя показатель баланса масс. Баланс масс ледникового щита определяется как разница между массой льда, образовавшейся от стекания в море континентальных ледников, осаднения и спекания снега на поверхности ледника и намерзания морского льда, и массой, потерянной при поверхностном и базальном таянии, а также при отделении айсбергов. Когда ледник находится в стабильном состоянии, эти две группы факторов уравнивают друг друга и ледник не изменяется ни по площади ни по толщине. Оказалось,

что, хотя некоторые крупные шельфовые ледники даже растут, большинство из них истончаются и уменьшаются по площади. Выяснилось, что высокая интенсивность айсбергообразования связана с процессами базального плавления, хотя ранее считалось, что эти два процесса, влияющие на сокращение ледников, протекают независимо друг от друга. На основе эмпирических наблюдений авторы выполнили оценку потери массы шельфовыми ледниками как в процессе айсбергообразования, так и в процессе базального плавления. Для периода 2005–2011 гг. эти значения составили 755 ± 24 Гт/год и 1516 ± 106 Гт/год соответственно. При этом для истонченных ледников темпы потери массы от айсбергообразования и базального плавления примерно равны (302 ± 27 и 312 ± 14 Гт/год). И для этой группы шельфовых ледников одновременно наблюдается истончение и отступление береговой линии. Принципиально у них меняется и механизм образования айсбергов. Характерными становятся частые отделения небольших айсбергов, в то время как у ледников с нейтральным или позитивным балансом масс отделения айсбергов от ледникового края происходят значительно реже, а сами айсберги имеют форму крупных изолированных пластин. Быстрое изменение гляциодинамического режима шельфовых ледников, выражающееся в спорадическом дроблении края ледниковой пластины, – достаточно новое явление, очевидно, связанное с климатическими изменениями. Ранее считалось, что общее потепление океана ведет только к росту темпов базального плавления. Авторы же делают вывод о том, что активное базальное плавление и утончение шельфовых ледников привели к смене режима гляциальной динамики в целом и сейчас сокращение площадей плавающих ледников Антарктики идет, прежде всего, за счет роста темпов отделения айсбергов.

В. В. Стрекопытов

Влияние широкомасштабного обезлесения на режим осадков в муссонных регионах: удаленные и локальные последствия

Effects of large-scale deforestation on precipitation in the monsoon regions: Remote versus local effects. N. Devaraju, Govindasamy Bala, Angshuman Modak. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3257–3262.

Человек активно вырубает леса на планете, используя все больше земель под сельскохозяйственное и промышленное производство. Если в 1750-х гг. (окончание доиндустриального периода) сельхозугодья занимали 6-7% поверхности Земли, то сейчас это значение составляет более 30%. Используя методы математического моделирования, авторы попытались оценить биогеофизические последствия широкомасштабного обезлесения для регионов с муссонным климатом. Делается вывод о том, что если упадок лесов в средних и высоких широтах Северного полушария продолжится, внутритропическая зона конвергенции (полоса вдоль экватора

между пассатами Северного и Южного полушарий) сместится к югу. Следствием этого станет существенное снижение нормы осадков в северных муссонных регионах (Восточная и Южная Азия, Северная Америка, Северная Африка) и слабое увеличение — в районах муссонного климата южного полушария (Южная Африка, Южная Америка и Австралия). Степень изменения режима осадков сильно зависит от масштаба и местоположения зон обезлесения. При этом удаленные последствия этого процесса могут быть даже сильнее, чем локальные. Самым уязвимым регионом является Индия, где снижение количества осадков вследствие вырубки лесов может достигать 18%. Результаты исследования показывают, что с помощью климатических моделей можно не только оценить возможные последствия необдуманного уничтожения лесов (включая оценку удаленного эффекта), но и рационально спланировать приложении усилий по восстановлению лесного покрова, а также — понять причины климатических изменений в прошлом муссонных регионов.

В. В. Стрекопытов

Изотопы водорода и кислорода водяного пара позволяют выявить «воду от сгорания» в городской атмосфере

Vapor hydrogen and oxygen isotopes reflect water of combustion in the urban atmosphere. Galen Gorski, Courtenay Strong, Stephen P. Good, Ryan Bares, James R. Ehleringer, Gabriel J. Bowen. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3247–3252.

Антропогенная активность вносит свои поправки в геохимический цикл воды. Одним из мало пока изученных процессов является образование так называемой «воды от сгорания» (water of combustion). Этот процесс представляет собой эмиссию водяного пара при сгорании ископаемого топлива. Недостаточное внимание к этому процессу, несмотря на признаваемую всеми важность участия «воды от сгорания» в атмосферных процессах крупных городов, было связано с отсутствием надежных методов обнаружения пара «от сгорания» в атмосфере и измерения его содержания. Авторы создали теоретическое обоснование

нового метода определения такого пара, доказав, что комбинации изотопных отношений Н и О в нем отличаются от обычного водяного пара. В качестве индикатора условий в источнике парообразования использовался показатель эксцесса дейтерия ($d = \delta^2\text{H} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$). Для проверки своего метода авторы провели замеры в атмосфере города Солт-Лейк-Сити (шт. Юта, США). Измерения проводились зимой, в период низкой влажности и общей стагнации атмосферы, чтобы избежать перемешивания воздуха в приповерхностной части. Предыдущими исследованиями было установлено, что именно в таких условиях происходит максимальное накопление в городской атмосфере двуокси углерода. Выяснилось, что доля пара «от сгорания» в приповерхностной атмосфере города составляет 13% от общего объема водяного пара. Новый метод поможет ученым более детально мониторить источники парниковых газов, а также создает инструментальную основу для изучения влияния «воды от сгорания» на городскую погоду, фотохимию атмосферы и качество жизни горожан.

В. В. Стрекопытов

Фрагментация среды обитания и ее продолженное влияние на экосистемы Земли

Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. Nick M. Haddad, Lars A. Brudvig, Jean Clobert, et. al. Science Advances. 2015. 1:e1500052 20 March 2015. P.1–9.

Разрушение и деградация природных экосистем является главной причиной упадка глобального биоразнообразия. Обычно разрушение среды начинается с ее фрагментации — разделения природных экосистем на изолированные фрагменты, отделенные друг от друга преобразованными человеком участками земной поверхности. Большая международная группа ученых наблюдала в течение 35 лет за влиянием фрагментации на биомы на пяти континентах. В качестве картографической основы использовались спутниковые снимки, по которым была составлена первая в мире

детальная карта лесных массивов. Выяснилось, что в настоящее время около 70% всей лесной растительности мира располагается на расстоянии не более 1 км от края леса, а нетронутые леса остались только в бассейнах рек Амазонка (Южная Америка) и Конго (Африка). Это говорит о том, что фрагментация достигла крайней степени. Этот антропогенный процесс серьезно подрывает ключевые функции экосистем, влияет на сокращение биоразнообразия (наблюдалось сокращение от 13 до 75% видов), снижение биомассы биомов и изменение питательных циклов. Степень нарушения экосистемных функций внутри фрагмента обратно пропорционально его размеру (чем меньше размер фрагмента, тем сильнее страдает его экосистема), и со временем только увеличивается. То есть фрагментация имеет отложенный эффект. Сделанные авторами выводы необходимо учитывать при планировании мер по консервации и восстановлению природных экосистем, а ландшафтное объединение их фрагментов должно стать одним из направлений экологического сервиса.

В. В. Стрекопытов

Динамическое свидетельство причинной связи между галактическими космическими лучами и межгодовыми вариациями глобальной температуры

Dynamical evidence for causality between galactic cosmic rays and interannual variation in global temperature. Anastasios A. Tsonis, Ethan R. Deyle, Robert M. May, George Sugihara, Kyle Swanson, Joshua D. Verbeten, Geli Wang. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3253–3256.

В отличие от электромагнитного излучения, которое состоит из безмассовых и ускоренных заряженных частиц, галактические космические лучи состоят в основном из ядер атомов и отдельных электронов, то есть из объектов, имеющих массы. Космические лучи образуются в результате разного рода процессов и доходят до Земли из разных источников, среди которых такие как: сверхновые звезды, ядра галактик и гамма-всплески. Ученые в течение многих десятилетий строили предположения о возможном воздействии галактических космических лучей на земную атмосферу, однако до настоящего времени не было установлено при-

чинной связи между изменениями климата и космическими лучами. В 1911 г. Томас Риз Уилсон установил, что ионизирующие излучения вызывают дробление облаков в атмосфере нашей планеты. Повышенная облачность в верхней тропосфере снижает количество проникающего к Земле длинноволнового излучения и, как предполагалось, приводит к повышению температур на нашей планете. Авторы статьи попытались установить причинную связь между космическим излучением и ежегодными изменениями глобальных температур. При проведении исследования использовался статистический метод ССМ (convergent cross mapping), разработанный для определения причинно-следственных связей между временными рядами величин в нелинейных динамических системах. Как и в случае метода тестирования причинности по Грэнджеру, в основе метода ССМ лежит положение, что предшествования ничего не говорит о наличии причинно-следственной связи (Cum hoc ergo propter hoc). Хотя авторам и не удалось обнаружить устойчивой долгосрочной причинной связи между космическими лучами и трендом глобального потепления в XX веке, выявлено влияние космических лучей на межгодовые колебания глобальных температур.

В. В. Стрекопытов

Нуклеация метастабильного арагонита CaCO₃ в морской воде

Nucleation of metastable aragonite CaCO₃ in seawater. Wenhao Sun, Saivenkataraman Jayaraman, Wei Chen, Kristin A. Persson, and Gerbrand Ceder. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3199–3204.

Предсказание условий, при которых вещество принимает метастабильную структуру в процессе кристаллизации из раствора — нерешенная фундаментальная задача синтеза материалов. Ее решение позволило бы рационально проектировать способы получения материалов, как получая метастабильные состояния, так и избегая их. Но, хотя известно, что химия раствора играет важную роль в том, какая именно полиморфная модификация образуется, плохо понятно, как именно это происходит. Продемонстрировано численное описание термодинамических параметров поверхностей и объемов в равновесии с водной средой, что позволило, исходя

из химии раствора, вычислить барьеры нуклеации конкурирующих модификаций. Таким образом можно предсказывать, как условия в растворе управляют выбором полиморфной модификации. Подход применен к «проблеме кальцита-арAGONита» — объяснению того, что в морской среде карбонат кальция предпочитает образовывать метастабильный арагонит, а не стабильный кальцит. Это важно в связи с вопросами биоминерализации, захвата углерода, палеобиохимии и устойчивости морских биосистем к повышению кислотности океана. Выявлена прямая связь поверхностной энергии кальцита и концентраций ионов Mg-Ca в растворе, показано что барьер нуклеации кальцита превышает барьер арагонита при отношениях Mg:Ca, соответствующих современному составу морской воды, что позволяет арагониту доминировать в кинетике нуклеации. Способность вычислять влияние параметров раствора на получаемую полиморфную модификацию — важный шаг на пути к созданию методики синтеза веществ из растворов.

А. В. Якименко

Климатические изменения в Передней Азии и последствия недавней засухи в Сирии

Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought. Colin P. Kelley, Shahrzad Mohtadi, Mark A. Cane, Richard Seager, Yochanan Kushnir. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3241–3246.

В последние годы Калифорния и Сирия переживают небывалые в своей истории засухи. Однако если в Калифорнии все спокойно, то в Сирии ухудшение климата стало одним из факторов кровавой гражданской междоусобицы. Авторы проанализировали данные наблюдений за погодой на территории Сирии за последние 80 лет. Они увидели снижение количества осадков, выпадающих над страной в зимнее время, и столь же стабильный рост среднегодовой температуры. С 1990 г. температура в регионе в среднем возросла примерно на 1-1,2 °C, а количество осадков уменьшилось на 10%. Все это вполне укладывается в современные представления о глобальном изменении климата, однако в

Сирии привело к совершенно беспрецедентным результатам. В результате засухи иссушенная почва северных провинций, бывших еще недавно главной житницей страны, почти не принесла урожая. В таких условиях началось катастрофическое распространение паразитического грибка, который повредил остатки урожая и посевов и уничтожил надежды сирийцев спасти свое сельское хозяйство. Сирийское правительство выбрало неэффективный путь решения продовольственной проблемы. Были вложены большие средства в местное сельское хозяйство, которые местные фермеры направили на увеличение орошения. Однако влага не удержалась в почве. Правительство было вынуждено срочно урезать субсидии, чтобы выровнять бюджет страны. В сельскохозяйственных областях начался хаос. В столицу хлынули потоки мигрантов — в первую очередь курдов, многие из которых отличались радикальным отношением к президенту Сирии Башару Асаду. Свои дома покинули около 1,3 млн человек, цены на продукты питания резко выросли. В стране развернулась волна массовых протестов, которые закончились войной.

В. В. Стрекопытов

Долгосрочное снижение потребления углерода лесами Амазонии

Long-term decline of the Amazon carbon sink. R. J. W. Brienen, O. L. Phillips, T. R. Feldpausch, et. al. Nature. 2015. Vol. 519. No 7543. P. 344–348.

Крупнейшими из всех наземных потребителей углерода являются биосистемы тропических лесов. Джунгли бассейна Амазонки, занимающие площадь 550 млн га, играют важнейшую роль в сохранении атмосферы на нашей планете, так как они поглощают и перерабатывают огромное количество углекислого газа. Тем не менее, до конца не понятно, как будет реагировать этот огромный наземный резервуар углерода на глобальные изменения климата и состава атмосферы. В последние десятилетия судьба лесов Амазонии вызывает большие опасения, в основном связанные с массовой вырубкой деревьев. Теперь же выяснилось, что существует и другая угроза. Более 100 экологов из разных стран начиная с 1983 г., изучали рост деревьев в бассейне Амазонки. Они выделили 321 контрольное место, где регулярно проводили замеры, изучали объем стволов и объем общей биомассы. Проанализиро-

вав историю эволюции динамики развития биомассы Амазонии за последние 30 лет, авторы обнаружили устойчивую долгосрочную тенденцию снижения накопления углерода биосистемой тропических лесов. Параллельно была отмечена тенденция снижения темпов увеличения биомассы — на треть, по сравнению с 1990-ми гг. Это связано с тем, что появление новых деревьев в Амазонии сейчас идет примерно с той же скоростью, что и раньше, а вот количество погибающих деревьев резко увеличилось. При этом гибель деревьев возросла в те годы, когда теоретически для них существовали вполне благоприятные условия и не было особенно засушливой погоды. Авторы предполагают, что общее увеличение двуокиси углерода в атмосфере способствует ускоренному росту деревьев, но этот, казалось бы, обнадеживающий факт, означает, что деревья, которые растут быстрее, и умирают раньше, что приводит к сокращению времени пребывания углерода в биосистеме. Наблюдаемое снижение потребления углерода лесами Амазонии совершенно не вписывается в общую глобальную тенденцию роста поглощения углерода земной поверхностью и заставляет пересмотреть существующие климатические модели.

В. В. Стрекопытов



Антропология и история

Ранний *Homo* возрастом 2,8 млн лет из Леди-Герару, регион Афар (Эфиопия)

Early *Homo* at 2.8 Ma from Ledi-Geraru, Afar, Ethiopia. Brian Villmoare, William H. Kimbel, Chalachew Seyoum, et. al. *Science*. 2015. Vol. 347. No 6228. P. 1352–1355.

Наше представление о происхождении и ранней эволюции рода *Homo* строится на редких находках возрастом 2,0–3,0 млн лет из Восточной Африки. В статье сообщается об обнаружении фрагмента нижней челюсти раннего *Homo* (2,75–2,80 млн лет) из местности Леди-Герару (Эфиопия). До сих пор древнейшей находкой *Homo* считалась верхняя челюсть AL 666-1 возрастом 2,33 млн лет. Образец сочетает в себе примитивные черты, присущие ранним *Australopithecus* с вторичными чертами морфологии, характерными для поздних *Homo*. Находка, которой было присвоено обозначение LD 350-1, представляет собой часть

левой стороны нижней челюсти с пятью зубами. Она была обнаружена в осадочных породах недалеко от поверхности в 2013 г. Приписать ее какому-то определенному виду не представляется возможным, но узкие коренные зубы и пропорции зубной арки не позволяют отнести находку на счет более близкого к обезьянам *Australopithecus afarensis* — вида австралопитека, который, как установлено, жил всего несколькими сотнями тысяч лет ранее. Эксперты считают, что челюсть принадлежала очень ранней форме того вида, эволюция которого в конце концов привела к появлению современного человека, хотя речь и не идет о прямом предшественнике *Homo sapiens*. Исследователи особенно заинтригованы по той причине, что окаменелость датируется периодом, от которого осталось очень немного подобных находок. Тем самым она проливает свет на эпоху, когда разделились ранние гоминиды и предок *Homo sapiens* отделился от обезьяноподобных австралопитеков, которые, хотя и были прямоходящими, имели меньший мозг.

В. В. Стрекопытов

Позднеплейстоценовые отложения, содержащие окаменелости, и условия существования раннего *Homo* из Афара (Эфиопия)

Late Pliocene fossiliferous sedimentary record and the environmental context of early *Homo* from Afar, Ethiopia. Erin N. DiMaggio, Christopher J. Campisano, John Rowan, et. al. *Science*. 2015. Vol. 347. No 6228. P. 1355–1359.

Фрагмент нижней челюсти древнейшего *Homo* был найден в январе 2013 г. в регионе Афар (Эфиопия), в местонахождении Леди-Герару. В 30–40 км от этого места находятся знаменитые сайты Хадар, Дикика и Гона, где были обнаружены многочисленные костные останки австралопитеков и ранних *Homo*, а также древнейшие орудия возрастом 2,6 млн лет. Отложения, в которых нашли челюсть человека из Леди-Герару (LD 350-1), заключены между двумя слоями вулканических туфов, датированных радиометрическими методами. Эти датировки, наряду с биостратиграфическими и палеомагнитными данными, позволили надежно установить

возраст челюсти: 2,80–2,75 млн лет. Таким образом, обладатель челюсти жил позже последних афарских австралопитеков (самые молодые находки *Australopithecus afarensis* имеют возраст около 3 млн лет) и значительно раньше древнейших *Homo* из Хадара (2,33 млн лет). Осадочные бассейны рифтовой зоны Восточной Африки содержат богатую ископаемую фауну, позволяющую не только достаточно точно датировать находки ранних гоминид, но и — восстановить условия окружающей среды, в которых происходила их ранняя эволюция. Судя по сопутствующей ископаемой фауне позвоночных, предполагаемый древнейший человек LD 350-1 жил в открытой и довольно сухой местности, похожей на современные африканские саванны, возможно с галерейными лесами вдоль берегов водоемов. Это следует из обилия останков травоядных и отсутствия древесных млекопитающих. На возможное присутствие галерейных лесов указывают кости дейнотериев, а находки ископаемых рыб, крокодилов и гиппопотамов свидетельствуют о многочисленных водоемах. Полученные данные согласуются с принятым мнением о важной роли климатических изменений и распространения саванн в происхождении и эволюции человека.

В. В. Стрекопытов

Новая уточненная датировка древних священных коралловых пирамидальных надгробий в Лелу (о. Косраэ, Микронезия)

New precise dates for the ancient and sacred coral pyramidal tombs of Leluh (Kosrae, Micronesia). Zoe T. Richards, Chuan-Chou Shen, Jean-Paul A. Hobbs, Chung-Che Wu, Xiuyang Jiang, Felicia Beardsley. *Science Advances*. 2015. 1:e1400060 13 March 2015. P.1–5.

Монументальные надгробные сооружения древних цивилизаций часто дают ценную информацию о технических возможностях, навыках и архитектурных знаниях представителей доисторических культур. Обычно такие сооружения, выполненные из абиотических материалов (камня, земли, глины), возводились над могилами важных особ. На острове Косраэ (Микронезия) в качестве материала для подобных построек использовались мадрепоровые кораллы отряда *Scleractinia*. Данные пирамидальные сооружения представляют собой два погребальных комплекса (сару), расположенных в

столице острова — поселении Лелу. Скорее всего, они играли роль сакральных сооружений, где происходили процедуры прощания с усопшими и осуществлялись временные захоронения. Ранее погребальные комплексы в Лелу, по аналогии с другими древними захоронениями, датировались по возрасту найденных в них останков. В данном случае, в могилах могли находиться лишь последние из временных захоронений. Авторы использовали более точный метод определения первичного возраста построек по U-Th отношениям во вторичном кальците кораллов, из которых сложены постройки. Результаты показали, что надгробья были построены в 14 в., то есть на три столетия раньше, чем считалось. Новые данные заставляют пересмотреть представления не только о времени заселения о. Косраэ, но и о роли Лелу в социальной и экономической жизни туземной цивилизации, так как для того чтобы построить погребальные комплексы такого размера, а также окружающие их стены, несомненно, требовалось наличие на острове высокоорганизованной социальной структуры.

В. В. Стрекопытов

Детальная генетическая структура населения Британии

The fine-scale genetic structure of the British population. Stephen Leslie, Bruce Winney, Garrett Hellenthal, et. al. *Nature*. 2015. Vol. 519. No 7543. P. 309–314.

Еще в 1990-х гг. британские генетики начали изучать ДНК жителей Соединенного Королевства, и в результате 20 лет исследований смогли выделить среди коренных жителей несколько четко различающихся групп. Однако количество этих групп оказалось не таким большим, как можно было бы предположить, учитывая разнообразие завоевателей, приходивших в разные времена на Британские острова. ДНК, отличающиеся от большинства британцев, как и предполагалось, оказались у кельтских народов — валлийцев, ирландцев, шотландцев, жителей Корнуолла. При этом выяснилось, что кельтские группы неоднородны и их гены, в свою очередь, различаются между собой. Новые данные проливают свет на

расселение кельтов, так как раньше считалось, что это была компактная этническая группа, постепенно распространявшаяся по Британии. Совершенно особые ДНК у жителей Уэльса, которые, очевидно, происходят от самостоятельных предков, не связанных с другими кельтскими народами. У остальных обитателей Великобритании генетическое разнообразие оказалось не слишком большим. Очевидно, бриты и англосаксы в далеком прошлом так тесно перемешались, что разницу между их потомками сегодня практически невозможно определить. Исследователи считают, что в центральной и юго-западной Англии генетическое наследие англосаксов колеблется между 10 и 40%. В то же время выяснилось, что гены большинства англичан несут большое сходство с жителями Германии, Франции и, в меньшей степени, Норвегии и Бельгии. При этом это сходство сформировалось до вторжения викингов в эпоху Раннего Средневековья или Вильгельма Завоевателя в XI веке. Очевидно, речь идет о каких-то неизвестных историкам массовых миграциях в более ранние времена.

В. В. Стрекопытов

Ключевые вопросы в изучении доместикации

Core questions in domestication research. Melinda A. Zeder. *PNAS*. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3191–3198.

Доместикация (одомашнивание растений и животных) — ключевой поворотный момент в человеческой истории. Вопрос доместикации привлекает к себе внимание ученых из самых разных областей. Только в 2013 г. этой теме было посвящено 811 статей, опубликованных в 350 различных журналах. В работе рассмотрены основные аспекты процесса доместикации, который определяется автором в терминах коэволюционного мутуализма между человеком и объектом одомашнивания, где влияние было взаимным, а не в терминах управления сельским хозяйством. Обсуждается практическая применимость для реконструкции доместикации генетических, фенотипических, адаптивных (пла-

стических по отношению к селекции) и контекстуальных (природных и культурологических) маркеров. Также сравниваются между собой две основные гипотезы первичного одомашнивания: 1) теория оптимизации жизнеобеспечения (добычи пропитания, расширения продуктовой линейки) и 2) теория нишевого обустройства. По сути дела, это push- и pull-подходы. Автор считает, что обустройство древним человеком жизненного пространства вокруг себя, создание так называемого «антропогенного ландшафта» (нишевая теория) было главной причиной начала доместикации, а биоэволюция происходила параллельно и во взаимосвязи с культурологической эволюцией человека. С этой точки зрения понятно, почему сейчас, в эпоху антропоцена, когда границы антропогенного ландшафта уже охватывают почти всю поверхность Земли, диким животным, не вписанным в экосистему человека, все труднее сохранять свое биоразнообразие и устойчивость.

В. В. Стрекопытов

Масса тела до беременности и набор веса при беременности у женщин в Индии и субсахарской Африке

Prepregnancy body mass and weight gain during pregnancy in India and sub-Saharan Africa. Diane Coffey. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3302–3307.

Несмотря на то, что индийские дети рождаются более здоровыми, чем африканские, они существенно отстают от последних в росте и весе. Существует предположение, что это связано со здоровьем и питанием матерей в период беременности. Используя материалы обзора Demographic and Health Surveys, подготовленного в 2005 г. ICF International, автор собрал статистику по таким показателям как индекс массы тела до беременности и набор тела во время беременности для женщин из Индии и африканских стран, расположенных к югу от Сахары. У 35,5% всех индийских женщин

возраста 15–49 лет обнаружилась нехватка веса. При этом у беременных женщин этот показатель еще хуже. Он достигает 42,2%. Для сравнения, только у 16,5% африканских беременных женщин вес ниже нормы, хотя для обоих регионов отмечается низкий показатель набора веса — около 7 кг за весь период беременности. Среднестатистическая жительница Индии, которая находится на последнем месяце беременности, весит меньше, чем жительница субсахарской Африки, срок беременности которой не превышает нескольких месяцев. Автор исследования считает, что на это влияет социальное положение молодых женщин в Индии. Девушки, недавно ставшие женами, находятся на нижней ступени семейной и социальной иерархий. Они часто недоедают, а также выполняют всю тяжелую работу. В момент наступления беременности они имеют недостаточную массу тела. Сегодня каждый пятый новый житель планеты рождается в Индии, поэтому проблема материнского здоровья в этой стране является глобальной.

В. В. Стрекопытов

Влияние биологической глобализации в Средиземноморье. Роль человека в глубинной истории охотничьей птицы

Impacts of biological globalization in the Mediterranean: Unveiling the deep history of human-mediated gamebird dispersal. Giovanni Forcina, Monica Guerrini, Hein van Grouw, et. al. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3296–3301.

Как минимум последние 10 тыс. лет человек оказывает активное влияние на расселение многих видов животных, определяющих сегодняшнее биоразнообразие. Долгая история перемещения человеком диких животных между странами и континентами привела к имеющей место сегодня в мире беспрецедентной гомогенизации биоты. И теперь уже далеко не всегда понятно, какой из видов является аборигенным для той или иной территории, а какой — натурализованным. Одним из путей перемещения была широко развитая ранее торговля экзотическими животными,

которых покупали для престижа, развлечения или разведения. В свое время одним из таких видов был черный турач (*Francolinus francolinus*) — птица, относящаяся к палеарктическим курообразным, которая достаточно долго являлась объектом охотничьего промысла в Европе, особенно в средние века и эпоху Ренессанса. Мясо турача считалось изысканной аристократической пищей и высоко ценилось за его вкус и целебные свойства (считалось афродизиак). Известная в западном Средиземноморье еще со времен Плиния Старшего, эта птица сегодня здесь полностью истреблена. Используя исторические источники, а также ДНК-анализ современных и архивных (13–20 вв.) образцов, авторы показывают, что туран был завезен человеком по торговым путям из Центральной Азии сначала на Кипр, а затем и дальше на запад — во все страны средиземноморского бассейна. Подобно турачу, во времена Александра Македонского в Грецию из Азии были завезены павлины (*Pavo cristatus*), а позже из Малой Азии на Сицилию завезли цесарку (*Numida meleagris*).

В. В. Стрекопытов

Биология

Голуби предпочитают стабильность эффективности при преодолении препятствий в условиях ограниченного полета

Pigeons trade efficiency for stability in response to level of challenge during confined flight. C. David Williams, Andrew A. Biewener. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3392–3396.

В условиях новых или необычных препятствий, животные используют различные стратегии, чтобы успешно маневрировать, поддерживая алгоритм последовательных движений либо изменяя его, чтобы обнаружить и обойти препятствие. В птичьих полетах стратегии такого выбора были мало исследованы, несмотря на ограниченную среду, в которой происходит гнездование, поиск пищи и охота. Ориентирование птиц в полете подробно изучалось с точки зрения миграции, однако мало внимания уделялось локальному ориентированию в средах с большим количеством препятствий. В описанном эксперименте 4 голубя преодолевают линейную цепочку из вертикальных столбов, расстояние между которыми различается от 0,2 до 0,4 размаха крыла. В ходе эксперимента выяснилось, что вместо четкой стратегии по преодолению препятствий все голуби использовали только две позиции: с постановкой крыльев и сложением крыльев. Голуби выбирали между положением, гарантирующим большую эффективность и положением, гарантирующим большую стабильность. Эффективная стратегия полета выбиралась там, где промежутки были шире и шанс столкновения был меньше, в то время как более стабильная стратегия использовалась только, когда возможность ошибки возрастала. То, что положение со сложенными крыльями менее эффек-

тивно подтвердилось напрямую: увеличением времени маневра и потерей высоты, и косвенно — аэродинамическими измерениями, проведенными на голубях и других птицах в экспериментах по прерывистым полетам в аэродинамической трубе, когда хлопанье крыльев временно прекращается. Однако, несмотря на то, что положению со сложенными крыльями не хватает эффективности, его преимущество состоит в повышенной устойчивости к пертурбациям или стабильности благодаря 1) меньшему плечу рычага, на которое может действовать сила при столкновении и 2) меньшему углу столкновения относительно поверхности крыла. Эти преимущества стабильности объясняют выбор маневра полета и предполагают элемент оценки риска, при котором определенное снижение эффективности балансируется с вероятностью столкновения. Выбор между двумя положениями опосредован элементом осторожности и неясности, если интерпретировать скорость приближения как косвенный показатель осторожности или неясности. Сниженная скорость полета дает время спланировать прохождение препятствия, но требует повышенных затрат энергии. Этот увеличенный расход энергии особенно заметен при скоростном режиме менее 5 м/с, который используется при приближении к препятствиям. Вероятно, значительное снижение скорости при увеличении труднопроходимости препятствия обозначает повышение уровня внимания птиц, что приводит к выбору позиции прохождения препятствия. В этих полетах с преодолением препятствий голуби продемонстрировали, что встречаясь с преградой, особь выбирает минимальное или значительное прерывание своего движения в зависимости от сложности препятствия. Данные результаты показывают, что птицы взвешивают потенциальные стратегии преодоления препятствий и оценивают сложность задания при выборе модели движения.

Н. Ю. Колесникова.

Отображение температурных условий в мозге дрозофил

Temperature representation in the Drosophila brain. Dominic D. Frank, Genevieve C. Jouandet, Patrick J. Kearney, Lindsey J. Macpherson, Marco Gallio. Nature. 2015. Vol. 519. No 7543. P. 358–361.

Резкие изменения температуры у дрозофил детектируются специальными рецепторами, и в мозге формируется карта холодных и горячих зон. Однако дрозофилы обладают множеством условных и безусловных температурных рефлексов, т.е. способны извлекать разнообразную информацию из простого входного сигнала. В данном исследовании изучен механизм восприятия температуры мозгом дрозофил. С помощью маркирования нейронов мозга фотоактивируемым зеленым флуоресцентным белком и избирательного маркирования тепловых и холодных рецепторов красным флуоресцентным белком удалось отследить пути передачи информации о температуре с периферии в мозговые центры. Было

показано, что эти пути сходятся в трех точках: грибовидных телах, боковых рогах и заднем боковом фоточувствительном мозге. Отслеживание транспорта кальция *in vivo* позволило охарактеризовать проекционные нейроны, селективно возбуждаемые либо тепловыми, либо холодными стимулами. Быстро адаптирующиеся нейроны эффективно передают информацию о резких колебаниях температуры, тогда как медленно адаптирующиеся нейроны лучше отражают амплитуду более слабых колебаний. Также удалось обнаружить популяцию проекционных нейронов, реагирующих как на тепловые, так и на холодные стимулы. Было показано, что эти клетки необходимы для нормальных поведенческих реакций при холодных и тепловых воздействиях. При инактивации этих нейронов дрозофилы избегали низких температур и предпочитали условия повышенной температуры (вплоть до болевого порога в 35 °C). Полученные результаты характеризуют координацию ответов нервной системы на изменение температуры.

А. Л. Братцева

Полиплоидия может стимулировать быструю адаптацию дрожжей

Polyploidy can drive rapid adaptation in yeast. Anna M. Selmecki, Yosef E. Maruvka, Phillip A. Richmond, Marie Guillet, Noam Shores, Amber L. Sorenson, Subhajyoti De, Roy Kishony¹, Franziska Michor, Robin Dowell, David Pellman. *Nature*. 2015. Vol. 519. No 7543. P. 349–352.

Полиплоидия – распространенное явление среди живых организмов, однако ее значение в эволюции остается неочевидным. Чтобы оценить значение амплификации генома в модели эволюции *in vitro*, были использованы дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*, искусственным путем приведенные к гаплоидному и производным от него диплоидному и тетраплоидному состоянию. Дрожжи выращивались на среде, бедной источниками углерода, содержащей раффинозу. Штаммы с различной ploidy культивировались совместно, при этом дрожжи с определенным числом хромосом синтезировали соответствующий флуоресцентный белок, что позволяло оценить соотношение штаммов в культуре. После 250 делений было отмечено, что тетраплоиды накапливаются более эффективно, чем гаплоидные и диплоидные организмы. Наблюдаемые в эксперименте закономерности были описаны с помощью двух математических моделей. Первая была основана на разветвлении эволюционного процесса, при этом погибнет клетка или даст потомство определялось ее приспособленностью, на которую влияют возникающие мутации. Вторая основывалась на преимуществах, даваемых мутациями и закреплении таких изменений в популяции. Исследование обеих моделей привело к общему выводу, согласно которому быстрая адаптация тетраплоидов является следствием большей частоты полезных мутаций и их значитель-

ного вклада в приспособляемость. При сравнении изменчивости геномов у штаммов с различной ploidy, у тетраплоидных дрожжей было отмечено более высокое разнообразие новых вариантов. Часто изменчивость затрагивала гены, связанные с сигнальным путем глюкозы, что характерно для дрожжей, растущих на среде с ограниченным содержанием источников углерода. Частота амплификации генов высокоафинных транспортеров гексоз, часто встречающейся при росте в условиях голодания, также была выше среди диплоидов и тетраплоидов по сравнению с гаплоидами. Для тетраплоидов было характерно присутствие анеуплоидий, прежде всего, повышение копии хромосомы XIII. Эта анеуплоидия возникает рано, при появлении дисбаланса между популяциями различной ploidy. Анеуплоидия давала преимущество тетраплоидам в условиях голодания, на среде, содержащей раффинозу, но не на глюкозосодержащей среде. Амплификация хромосомы XII имела обратный эффект. В случае диплоидов, в условиях голодания амплификация XIII не давала преимуществ и ослабляла штамм на полноценной среде. Ген SNF3, мембранного рецептора глюкозы, часто мутирует при росте в условиях голодания, как правило это мутации G439E, G439V и G439R, которые дают преимущества при росте на раффинозе, причем у тетраплоидов эффект более выражен. Таким образом, генетическая пластичность полиплоидного набора хромосом в сочетании с преимуществами полиплоидного состояния повышает приспособляемость организмов. Полиплоидность увеличивает генетическое разнообразие популяции. При росте в условиях голодания у полиплоидов наблюдается более высокая частота мутаций и более выраженный эффект возникших изменений. Анеуплоидии, характерные для полиплоидов, также могут вносить вклад в приспособляемость, повышая изменчивость генома.

А. Н. Ваганова

Визуализация пространственно-временной динамики процесса апоптоза *in vivo* с помощью рационального дизайна флуоресцентного протеазного репортера

Rationally designed fluorogenic protease reporter visualizes spatiotemporal dynamics of apoptosis in vivo. Tsz-Leung To, Beverly J. Piggott, Kalpana Makhijani, Dan Yu, Yuh Nung Jan, Xiaokun Shu. *PNAS*. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3338–3343.

Протеазы играют фундаментальную роль во многих основных биологических процессах. В геноме человека содержится примерно 600 протеаз и их гомологов, в то время как в геноме также имеется примерно 500 протеинкиназ. Нарушение работы протеолитических систем приводит к возникновению различных заболеваний, включая рак. Чтобы регистрировать изменения протеазной активности непосредственно в клетках, были разработаны генетически кодируемые флуорогенные репортеры, обладающие достаточно сильным сигналом, что позволило исследователям нивелировать влияние автофлуоресценции тканей и гетерогенности клеток. Такие репортеры обладают большой ценностью для понимания роли протеаз в развитии животных и человека и возникновении заболеваний. Репортеры, основанные на переносе резонансной энергии флуоресценции, широко используются при попытках визуализации внутриклеточных сигнальных путей. Однако их применение в условиях *in vivo* оказалось затруднено из-за слабой интенсивности сигнала. Использование флуорогенных репортеров позволило в некоторых случаях преодолеть эту проблему. В то же время, до сих пор не было сообщений об успешном применении флуорогенных репортеров для визуализации активности протеаз *in vivo*. В насто-

ящей работе авторы получили флуоресцирующий в инфракрасной области белок на основе бактериального фитохрома, биливердина (как хромофора) и фрагмента зеленого флуоресцентного белка. Дизайн искомого белка был осуществлен таким образом, чтобы внедрение хромофорной группы в белок регулировалось протеазной активностью. После активации протеазой инфракрасный флуорогенный репортер протеазной активности становился флуоресцентным без привлечения какого-либо экзогенного кофактора. Чтобы продемонстрировать возможности применения в биологии, авторы приготовили инфракрасный флуорогенный репортер каспазы. С его помощью была показана координация во времени и пространстве между апоптозом клеток и эмбриональным морфогенезом, а также динамика апоптоза во время канцерогенеза у *Drosophila*. Полученный авторами каркас протеазного репортера может быть использован в качестве основного модуля для дизайна репортеров других протеаз, обладающих избирательной специфичностью. По мнению авторов, разработанная ими технология может помочь исследователям в различных ситуациях, включая мониторинг протеазной активности *in vivo*. Эта технология может быть эффективна при проведении различий между сигнальными путями, регулирующими протеазную активность, и при осуществлении широкомасштабного скрининга ингибиторов протеаз с перспективой их использования в различных биологических исследованиях и для разработки лекарств. В целом, в настоящей работе авторами показано, что разработанный ими на основе бактериальных фитохромов инфракрасный флуоресцентный белок представляет собой перспективную молекулярную основу для инжиниринга флуорогенных репортеров с целью визуализации пространственно-временной динамики активности внутриклеточных сигнальных путей *in vivo*.

И. М. Мохосев

Эндоканнабиониды как ингибиторы Hh-сигнального пути

Endocannabinoids are conserved inhibitors of the Hedgehog pathway. Helena Khaliullina, Mesut Bilginb, Julio L. Sampaiob, Andrej Shevchenko, Suzanne Eaton. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3415–3420.

Секретируемый протеин Hedgehog (Hh) имеет схожий сигнальный путь у дрозофил и млекопитающих. Он участвует в процессе дифференциации и развития клеток в эмбриогенезе. Сигнальная трансдукция Hh регулирует тканевую гомеостаз, влияет на физиологические функции организма, в том числе обмен липидов и углеводов, ноцицепцию, ишемическую реакцию и иммунную активацию, а также участвует в процессах канцерогенеза. Hh образует липидно-модифицированные лиганды для двух трансмембранных белков: 12-мембранного протеина (Ptc) и 7-трансмембранного протеина (Smo). В отсутствие связи с Hh-лигандом Ptc репрессирует Smo, блокируя выход Smo из эндосом. Протеин Ptc выполняет функции опухолевого супрессора, а гиперактивация Smo лежит в основе развития многих опухолевых процессов, в силу его протоонкогенной направленности. Smo-протеины особенно чувствительны к химическому ингибированию и их активность может быть модулирована разными вариантами экзогенных и эндогенных низкомолекулярных соединений. Однако механизм эндогенной Smo модуляции сигнального пути у млекопитающих еще до конца не изучен. Понимание эндогенных процессов регуляции сигнальных путей Smo позволит укрепить аналитическую базу для фармацевтических разработок. В данном исследовании использовано биохимическое фракционирование и липидомический анализ для идентификации липидов-ингибиторов Smo. Материалом для исследования служи-

ли образцы сыворотки крови человека и гемолимфа личинок дрозофил. Применялась липидная масс-спектрометрия липопротеинов очень низкой плотности (ЛПОНП), т.к. они содержат липиды, подавляющие внутриклеточную Smo сигнализацию. Фракционирование проводилось путем обращенно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Также использовалась масс-спектрометрия с преобразованием Фурье и тандемная масс-спектрометрия для поиска сигнальных липидов, чья концентрация достигает пика при элюировании фракций ЛПОНП. Анализ образцов выявил низкий показатель совпадения для известных регуляторов сигнальных путей, таких как витамин D3, 7-дегидрохолестерол или гидроксистерол, но тандемная масс-спектрометрия обнаружила высокую активность эндоканнабионидов и эндоканнабионид-связанных молекул. Эндоканнабиониды участвуют в липопротеидном обмене людей и дрозофил, действуя непосредственно на Smo в физиологических концентрациях для подавления сигнальной системы. Результаты исследований связывают организменный метаболизм с локальной Hh-сигнализацией и предполагают ранее не исследованные механизмы физиологической активности каннабионидов. Эндоканнабиониды и Hh-сигнальная система регулируют почти одни и те же процессы, например, ангиогенез, развитие фолликул волос, ноцицепцию, образование костной ткани и энергетический обмен. Фитоканнабиониды и N-ацилэтанол амины либо связывают Smo в трансмембранном «кармане», либо влияют на структуру трансмембранного участка аллостерически. Таким образом, эти молекулы являются прямыми агонистами отрицательных аллостерических модуляторов Smo и способны связываться непосредственно с Smo-протеинами млекопитающих, что представляет большой фармакологический интерес.

Е. М. Степанова

Быстрое изменение поведения при стрессе ускоряет развал колоний медоносных пчел

Rapid behavioral maturation accelerates failure of stressed honey bee colonies. Clint J. Perry, Eirik Søvik, Mary R. Myerscough, Andrew B. Barron. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3427–3432.

Резкое сокращение популяций медоносных пчел стало уже глобальной проблемой. И если причины, по которым происходит коллапс колоний медоносных пчел, более или менее понятны — применение пестицидов и сельскохозяйственных химикатов, активизация пчелиных паразитов, экологические изменения, смена структуры питания, — то сам механизм быстрого упадка колоний остается неясным. Авторы исследования попытались выяснить, какие именно реакционные механизмы включаются у пчел в ответ на стресс и почему при неблагоприятных условиях так быстро вымирает вся взрослая популяция колоний. Для этого изучалась социальная динамика пчел в период, непосредственно предшествующий коллапсу. Исследование удалось провести с помощью крошечных радиомаячков, надевавшихся на особей различного возраста. Устройства позволяли отслеживать полеты пчел из улья на фуражировку и обратно. Авторы обнаружили, что внезапный характер коллапса может иметь отношение к изменениям в поведении пчел при фуражировке, когда молодые рабочие пчелы начинают вылетать из улья в поисках пищи раньше, чем наберутся достаточного жизненного опыта, работая в безопасных «домашних» условиях. Если колония пчел погружена в кризис, то коллективное поведение насекомых

выражается в отправке на сбор пищи самых молодых и неопытных особей. Вероятность преждевременно умереть у таких пчел выше, чем у более зрелых насекомых. Таким образом, вероятно, проявляется адаптивное поведение колонии, связанное с возникновением стресса. Но если период повышенной смертности продолжается слишком долго или если улей слишком мал, чтобы выдерживать кризис даже в течение короткого срока, этот естественный ответ может разрушать социальный баланс колонии и привести к катастрофическим последствиям. Слишком молодые сборщики пищи успевают совершить за свою жизнь намного меньше вылетов, поскольку у них слишком велик риск погибнуть. Согласно построенной в связи с этим математической модели, возникает положительная обратная связь: чем больше рабочих пчел преждевременно начинают заниматься фуражировкой, тем больше изменяется стратегия улья, отправляющего за пищей все более и более молодых рабочих пчел. Это окончательно разрушает систему разделения труда и приводит почти к полной потере взрослой популяции — в улье остаются только пища, личинки и несколько взрослых особей. Ключевой признак развала колонии — полное исчезновение рабочих пчел и крайняя нехватка в улье взрослых насекомых. Подобный коллапс колоний является причиной быстрого сокращения численности пчел в Северной Америке. В последнее десятилетие популяция пчел там ежегодно уменьшилась в среднем на 30%. Результаты исследования показывают, что отслеживание нижней границы возраста фуражиров — хороший способ оценить общее состояние улья. Работа проливает свет на причины коллапса колоний медоносных пчел и может помочь в поиске путей его предотвращения.

В. В. Стрекопытов

Регуляторная связь между метилированием ДНК и активным деметилированием у *Arabidopsis*

Regulatory link between DNA methylation and active demethylation in *Arabidopsis*. Mingguang Lei, Huiming Zhanga, Russell Julian, Kai Tang, Shaojun Xie, Jian-Kang Zhu. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3553–3557.

ДНК-метилирование *de novo*, опосредованное РНК, и активное деметилирование ДНК играют важную роль в регуляции работы генома растений. Опосредованный РНК путь метилирования *de novo* регулируется путем комплементарного взаимодействия с длинными и короткими некодирующими РНК. Антагонистом этого процесса является ROS1 – ДНК-деметилаза, предотвращающая избыточное метилирование. При дефектах системы РНК-зависимого метилирования экспрессия ROS1 подавляется, что говорит об их взаимосвязи. В данном исследовании на модели *Arabidopsis thaliana* был описан механизм, регулирующий экспрессию ROS1. Для выявления генов, регулирующих метилирование промоторных областей, растения были модифицированы вектором, в котором под промоторами вируса мозаики цветной капусты 35S находились гены транспортера сахарозы 2 и гидромицин фосфотрансферазы II. При росте на среде с сахарозой рост корня у таких растений останавливается из-за активного поступления сахарозы в его ткани. У мутантов с мутациями генов *ros1* и *idm1*, продукт которого необходим для работы ROS1, а также генов системы метилирования ДНК по РНК-зависимому пути, промотор 35S был метилирован, а экспрессия генов, находящихся под его контролем, ингибировалась, благодаря чему корень развивался нормально. Сравнение метилирования ДНК у растений дикого типа и мутантных форм

с нарушениями генов *nprpd1* и *nprpe1* показало, что данные мутации приводят к потере метилирования в 5' некодирующей области ROS1 и гелитроне, содержащемся в его промоторе. При этом мутации *nprpd1* и *nprpe1* не сказывались на метилировании других участков гена ROS1. Продукты генов NRPD1 и NRPE1 являются субъединицами полимераз Pol IV и Pol V, участвующих в метилировании ДНК по РНК-зависимому пути. Высокопроизводительное РНК-секвенирование выявило малую некодирующую РНК, включавшую 24 нуклеотида, которая задействована в метилировании промотора ROS1. В контролируемом ею участке, как было показано ранее, связывается Pol V. Распределение ROS1 в хроматине было оценено путем иммунопреципитации генома растений с мутацией *ros1* получивших нормальную последовательность ROS1, построенную тремя участками, кодирующими FLAG, в качестве антигенной метки путем трансфекции. Иммунопреципитация антителами к FLAG выявила связывание ROS1 в описанном регионе промоторной области гена ROS1. Таким образом, данная область метилируется системой РНК-зависимого метилирования и деметилируется с участием ROS1. В растениях с мутациями *ros1* экспрессия мутантного гена повышалась, что говорит о стимулирующем влиянии метилирования в промоторном регионе гена на его экспрессию. Выявленная область в промоторе гена, кодирующего ROS1, восприимчива к сдвигам баланса метилирования и деметилирования в клетке и координирует уровень экспрессии ROS1 в соответствии с его колебаниями. Гелитрон в промоторной области ROS1, вероятно, негативно регулирует его экспрессию, и метилирование участка между гелитроном и 5' некодирующей областью гена снимает подавляющий эффект, за счет чего повышенная активность систем метилирования стимулирует экспрессию деметилазы ROS1.

А. Н. Ваганова

Существенно сокращенный вариант сплайсосомы у *Cyanidioschyzon merolae*

Dramatically reduced spliceosome in *Cyanidioschyzon merolae*. Martha R. Stark, Elizabeth A. Dunn, William S. C. Dunn, Cameron J. Grisdale, Anthony R. Daniele, Matthew R. G. Halstead, Naomi M. Fast, Stephen D. Rader. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. E1191–E1200.

Сплайсосома является внутриклеточной молекулярной машиной, отвечающей за удаление интронов из эукариотических информационных РНК, и представляет собой одну из наиболее сложно организованных внутриклеточных структур. Сплайсосома в клетках человека представляет собой большой рибонуклеопротеиновый комплекс, катализирующий сплайсинг пре-мРНК. Он включает в себя пять малых ядерных РНК (snRNA) и более 200 различных белков. При этом для сплайсосомы человека характерны многочисленные вариации состава и формы, что существенным образом затрудняет изучение ее структуры и функций. В связи с этим обстоятельством, основные работы были осуществлены на сплайсосоме дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, которая рассматривается как упрощенная система, содержащая гораздо меньше дополнительных факторов в сравнении с сплайсосомой человека. Тем не менее, и в этом случае оказалось весьма затруднительным описать функции индивидуальных факторов сплайсинга или даже выявить факторы, являющиеся критическими для реакции сплайсинга. В настоящей работе авторы идентифицировали и охарактеризовали компоненты машинерии сплайсинга у красных водорослей *Cyanidioschyzon merolae*, у которых имеется только 26 интрон-содержащих генов. Авторами было показано, что малые ядерные РНК U2, U4, U5 и U6 содержат, как и ожидалось, консервативные

последовательности и способны образовывать вторичные структуры и межмолекулярные взаимодействия между основаниями, аналогично другим организмам. Также в клетках *C. merolae* было идентифицировано 43 белка, тесно связанных с процессом сплайсинга, и возможно, присутствующих в других организмах, что значительно ниже количества белков, идентифицированных в клетках пекарских дрожжей (90) и человека (140). В то же время, авторы не смогли обнаружить малую ядерную РНК U1 или любой предсказанный, ассоциированный с U1 белок, что позволило им выказать предположение о том, что в клетках *C. merolae* процесс сплайсинга может протекать без участия малого ядерного рибонуклеопротеина U1. Более того, авторы провели картирование идентифицированных ими белков и привязали их к отдельным стадиям сплайсинга. В соответствии с полученными результатами, ими было высказано предположение, что в сравнении с другими организмами в клетках *C. Merolae* наблюдается наименьшая вариация состава сплайсосомы. Авторы особо подчеркивают, что именно этот состав сплайсосомы отражает тот минимальный набор белков, необходимый для осуществления процесса сплайсинга. Наблюдаемое снижение количества факторов сплайсинга совпадало с удалением компонентов сплайсосомы, играющих при сплайсинге периферическую или модуляторную роль. При этом в составе сплайсосомы сохраняются преимущественно те белки, которые играют более важную роль в организации и осуществлении катализа. Авторы настоящей работы считают, что клетки *Cyanidioschyzon merolae* могут быть использованы в качестве подходящей модельной клеточной системы для изучения каталитического ядра сплайсосомы и понимания механизма сплайсинга.

И. М. Мохосев

Мутация в миозине VI, ассоциированная с глухотой, предотвращает инициацию его поступательного движения на актине

Myosin VI deafness mutation prevents the initiation of processive runs on actin. Olena Pylypenko, Lin Song, Ai Shima, Zhaohui Yang, Anne M. Houdusse, H. Lee Sweeney. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. E1201–E1209.

Миозин VI стоит особняком среди известных представителей миозинов в клетках животных, так как он передвигается в обратном направлении по актиновому филаменту. Эта уникальная направленность движения миозина VI вместе с его способностью функционировать как поступательный переносчик и зависимый от нагрузки якорь обуславливают важную роль в клетке, которая не может быть компенсирована каким-либо другим миозиновым мотором. Установлено, что мутации в миозине VI могут привести к глухоте у человека. В настоящее время идентифицированы три ассоциированные с глухотой аминокислотные замены в моторном домене миозина VI человека: C442Y, H246R и E216V. В то же время, у мышей выявлена только одна миссенс-мутация в моторном домене (D179Y). В этом случае у мышей наблюдалась потеря координации между двумя головками миозина. На клеточном уровне эта мутация вызывала нарушение процесса эндоцитоза. Также было показано, что эти мутации могут вызвать нарушение организации и функционирования стереоцилий-механочувствительных органелл волосковых клеток, находящихся в кохлеарном аппарате. Кроме того, было показано, что миозин VI способен осуществлять определенные перемещения вдоль актинового филамента. При этом, основное время миозин VI находится связанным с актином и неспособен совершать передвижения. В настоящей работе ав-

торы показали, что именно замена остатка аспарагиновой кислоты в 179 положении на тирозин (D179Y) в передающем участке миозина VI приводит к нарушению связи между высвобождением продукта гидролиза АТФ (неорганический фосфат) и связыванием с актином. Кроме того, нарушается способность одиночных димерных молекул поступательно двигаться на актиновых филаментах. Авторы показали, что поступательное движение может быть восстановлено, если добавить АТФ к мутантному димеру после связывания обоих головок с актином в отсутствие АТФ. Таким образом, показано, что мутация избирательно разрушает процесс инициации поступательного движения при физиологических концентрациях АТФ. Омегакаптив, лекарство, которое ускоряет активируемую актином активность миозина сердечной мышцы, оказался способен спасать поступательное движение димеров, несущих аминокислотную замену D179Y, при физиологических концентрациях АТФ, замедляя актин-зависимое высвобождение неорганического фосфата. По результатам своей работы авторы предложили механизм, согласно которому происходит блокирование связывания АТФ с ведущей головкой димера. В этом случае миозин VI может переместиться на примерно один микрометр вдоль актинового филамента. В то же время, в случае его избытка димер миозина VI также может выступать в качестве своеобразного якоря, который тормозит процесс. В целом, в настоящей работе авторами с помощью мутационного анализа миозина VI, вызывающего глухоту, показано, что аминокислотная замена (D179Y) в этом белке приводит к нарушению инициации его поступательного движения в физиологических условиях. Авторы также высказали предположение, что глухота может быть скорректирована с помощью применения малых молекул, способных избирательно воздействовать на миозин VI.

И. М. Мохосоев

Глобальное распространение и локальная диверсификация микробиом мест высачивания метана

Global dispersion and local diversification of the methane seep microbiome. S. Emil Ruff, Jennifer F. Biddle, Andreas P. Teske, Katrin Knittel, Antje Boetius, Alban Ramette. PNAS. 2015. Published ahead of print March 16, 2015, doi:10.1073/pnas.1421865112.

На океанском дне существуют участки, главным образом расположенные вдоль континентальных окраин, где происходит высачивание из недр газообразного метана и других углеводородов с последующей их эмиссией в атмосферу. Темпы эмиссии контролируются метан-окисляющими микроорганизмами, обитающими в местах высачивания. В результате метаболических процессов этих организмов вырабатывается энергия, которой питаются их экосистемные симбиоты — богатое сообщество бентосных (донных) микроорганизмов и животных. Для мест холодного высачивания метана характерно наличие собственной донной экосистемы. До 75% высачивающегося метана (0,06 Гт углерода в год) потребляется на месте локальными микро- и макроорганизмами зон высачивания и расположенных по их периферии сульфат-метановых переходных зон. Таким образом, экосистемы этих двух зон выполняют важнейшую экологическую функцию контроля потенциальной эмиссии метана океаном. Несмотря на несомненную значимость протекающих в метанпродуцирующих экосистемах биогеохимических процессов, до последнего времени было практически ничего не известно о глобальном распространении и видовом разнообразии микробиоты мест высачивания. Использование новейших методов секвенирования и глобальных баз данных позволило перейти от идентифика-

ции отдельных членов микробиосообществ к пониманию глобальных паттернов распространения микроорганизмов. Авторами были изучены 23 биосообщества мест холодного высачивания метана с точки зрения их биоразнообразия и структурной организации, а также проведено их сравнение с 54 другими донными экосистемами, включая биомы сульфат-метановых переходных зон, зон глубинных гидротерм («черных курильщиков»), прибрежной осадочной зоны, зон глубоководного и близповерхностного осадконакопления. Было обнаружено, что сообщества мест высачивания характеризуются средним уровнем видового разнообразия по сравнению с другими морскими биомами. Наряду с широко распространенными (космополитичными) видами микроорганизмов, они включают в себя бактерии и археи, обладающие специфическими биогеохимическими функциями и обитающие только в местах холодного высачивания. От других донных микробиом экосистем зон высачивания отличается обилие анаэробных метанотрофных архей, аэробных *Methylococcales*, сульфатредуцирующих *Desulfobacterales* и сульфидокисляющих *Thiotrichales*. Детальный видовой состав меняется в зависимости от условий окружающей среды — глубины осадконакопления и придонной температуры. Высокая степень эндемизма микробиом мест высачивания метана говорит о значительной локальной диверсификации этих долгоживущих гетерогенных экосистем. Авторы делают вывод о том, что экосистемы мест высачивания метана являются замкнутыми обособленными биомами, лишь редкие микроорганизмы которых входят в состав других бентосных сообществ, напоминая в этом смысле островные биосообщества. Однако именно космополитичные виды обеспечивают устойчивость специфичных биом зон холодного высачивания метана на дне океана.

В. В. Стрекопытов

Полный геном тибетской лягушки *Nanorana parkeri* и общие проблемы эволюции геномов позвоночных

Whole-genome sequence of the Tibetan frog *Nanorana parkeri* and the comparative evolution of tetrapod genomes. Yan-Bo Sun, Zi-Jun Xiong, Xue-Yan Xiang, et. al. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. E1257–E1262.

В последнее время число полностью секвенированных геномов животных быстро растет. Однако среди всех амфибий исследователям до последнего времени был доступен геном только одного вида – шпорцевой лягушки *Xenopus tropicalis*, далеко не самого типичного представителя бесхвостых амфибий. Для подотряда Neobatrachia, к которому относится 96% видов отряда Anura, не было известно ни одного полного генома. Чтобы заполнить этот пробел, китайские исследователи впервые секвенировали геном высокогорной, или тибетской, лягушки *Nanorana parkeri* (семейство

Discoglossidae). В этом геноме найдено более 20 000 белок-кодирующих генов – примерно столько же, сколько и у *X. tropicalis*. Однако размер генома *Nanorana* оказался существенно больше, чем у *Xenopus* (2,3 гигабаза против 1,5 гигабаз), вероятно, за счет вставок большого числа мобильных элементов. Общий уровень синтении у *Nanorana* и *Xenopus* оказался довольно высоким, несмотря на древность дивергенции (вероятная датировка – примерно 266 млн лет назад). Это указывает на низкую скорость структурной эволюции генома бесхвостых амфибий по сравнению, например, с геномом млекопитающих и птиц. Высказана гипотеза, что более медленное накопление хромосомных перестроек связано с более низкой скоростью метаболизма у пойкилотермных животных по сравнению с гомеотермными. Кроме того, в обоих геномах выделено значительное количество высококонсервативных элементов, специфичных для бесхвостых амфибий, что должно в дальнейшем облегчить построение филогений этого отряда.

С. А. Ястребов

Разнообразие генов зрительных опсинов у стрекоз

Extraordinary diversity of visual opsin genes in dragonflies. Ryo Futahashi, Ryouka Kawahara-Miki, Michiyo Kinoshita, Kazutoshi Yoshitake, Shunsuke Yajima, Kentaro Arikawa, Takema Fukatsu. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. E1247–E1256.

Образ жизни стрекоз сильно зависит от цветного зрения, с которым связано разнообразие светочувствительных белков. Изучение геномов и транскриптомов трех стрекоз из семейства Libellulidae выявило 20 генов белков-опсинов. Четыре белка из этих 20 не имеют отношения к зрению, а 16 являются светочувствительными; из последних 5 относятся к коротковолновым опсином, 10 к длинноволновым, и один чувствителен к ультрафиолетовым лучам. Более обширное исследование транскриптомов других видов стрекоз, относящихся в общей сложности к 10 семействам, позволило выявить

до 33 различных генов опсинов. Молекулярно-филогенетический анализ показывает, что в эволюции стрекоз многократно происходили как дупликации, так и потери генов этой группы. Также установлено, что если у взрослых стрекоз обычно экспрессируется сразу много генов опсинов (как коротковолновых, так и длинноволновых), то у личинок активных генов гораздо меньше, причем коротковолновой из них, как правило, всего один, а остальные – длинноволновые. Вероятно, это связано с тем, что в жизни личинки зрительная ориентация в целом имеет меньшее значение; при этом восприятие зрительного анализатора в подводных условиях смещено в сторону длинных волн. Наблюдаемое у стрекоз разнообразие белков-опсинов и их генов огромно, учитывая, что у большинства других животных таких белков всего три или четыре. У стрекоз их на порядок больше. Этот «взрыв» эволюции опсинов обеспечивает разнообразие приспособлений стрекоз к окружающей среде на уровне как физиологии, так и поведения.

С. А. Ястребов

Полувековые наблюдения в западной Канаде показывают, что динамика развития лесов определяется прежде всего конкуренцией, а только потом – климатическими изменениями

Half-century evidence from western Canada shows forest dynamics are primarily driven by competition followed by climate. Jian Zhang, Shongming Huang, Fangliang He. PNAS. 2015. Published ahead of print March 16, 2015, doi:10.1073/pnas.1420844112.

Лесные системы по всему миру претерпевают быстрый упадок, причины которого ученые обычно пытаются найти в климатических изменениях регионального уровня, уделяя крайне малое внимание процессам, происходящим внутри самих систем. Главными параметрами динамики развития и устойчивости лесных систем являются темпы роста, смертности и восстановления. За последние несколько десятилетий выросли именно темпы смертности, что традиционно объясняется климатическими изменениями, особенно ощутимыми в высоких широтах Север-

ного полушария. Причины смены долгосрочных трендов роста и восстановления вообще не выяснены. Авторы провели компиляцию данных наблюдений за лесными системами, проводимых в период 1958–2009 гг. в западной Канаде. Наблюдения проводились на 1680 стационарных естественных полигонах. В результате анализа были выявлены существенные изменения демографических параметров лесов за последние 50 лет: повсеместный существенный рост смертности, значительное снижение темпов роста деревьев и слабый отрицательный тренд восстановительной способности систем. Авторы изучили относительную важность для динамики лесных систем внешних (изменение климата) и внутренних (конкуренция между растениями) факторов. Было показано, что именно внутренняя конкуренция является фактором, отвечающим за долгосрочные изменения в лесных биосистемах. Фактор регионального климата лишь в некоторой степени влияет на параметр смертности деревьев и не влияет на рост и восстановление. Это значит, что выводы, сделанные во многих предыдущих исследованиях, базировавшихся на климатическом моделировании, стоит критически пересмотреть с точки зрения динамики развития лесных биосистем.

В. В. Стрекопытов

Климатические изменения и загрязнение окружающей среды приводят к быстрому упадку популяций рыбок данио-рерио

Climate change and pollution speed declines in zebrafish populations. A. Ross Brown, Stewart F. Owen, James Peters, et. al. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. E1237–E1246.

Когда говорят о влиянии экологических изменений на состояние популяций диких животных, чаще всего делают акцент на глобальном потеплении и загрязнении окружающей среды. Мощными загрязнителями биосферы являются эндокринные дизрапторы (endocrine disrupting chemicals, EDCs) – экзогенные вещества антропогенного происхождения – пестициды, гербициды, полихлорированные бифенилы, бисфенол А, полибромидные дифениловые эфиры, фталаты и др. Попадая в организм, они связываются с рецепторами гормонов и оказывают гормоноподобные эффекты, а также нарушают секрецию гормонов эндокринными железами, что приводит к нарушению гормональных механизмов эндогенной регуляции метаболических процессов, репродуктивной функции и адаптивных реакций организма, способствует возникновению различных гормонально зависимых заболеваний человека и животных. Известно также, что EDCs могут влиять на половую детерминацию. Это особенно опасно для замкнутых (инбредных) популяций, в которых соблюдение баланса между мужскими и женскими особями является условием выживания. Существует гипотеза, что неблагоприятные условия окружающей среды могут привести к депрессии перекрестного скрещивания и стохастическим флуктуациям численности самцов и самок. Однако эмпирические данные, под-

тверждающие эту гипотезу, до сих пор отсутствовали. Данная работа является первым серьезным эмпирическим исследованием жизнестойкости замкнутой природной популяции в условиях моделирования меняющегося климата (повышения температуры среды) и воздействия эндокринных дизрапторов. На примере популяции рыбок данио-рерио (*Danio rerio*) показано, что совместное действие этих двух факторов выразилось в смещении гендерного баланса в сторону самцов, и именно с этим был связан упадок биосообщества. В качестве контрольной группы выступала открытая популяция *D. rerio*. Начальная температура воды составляла 28 °C (медианная температура нормального нереста данио-рерио). Конечная температура была 33 °C (прогнозное повышение температур к 2100 г., исходя из климатических моделей). В качестве модельного дизраптора был выбран клотримазол – широко используемый антигрибковый химический препарат, подавляющий стероидогенный фермент цитохром P450(CYP19) ароматазу, необходимый позвоночным для синтеза эстрогена. Каждый из двух факторов изменения среды (повышение температуры и загрязнение клотримазолом) по отдельности также приводил к сдвигу гендерного баланса, а при совместном действии эффект усиливался. В замкнутой популяции данный эффект проявлялся даже при низких концентрациях клотримазола (2 мг/л), а в открытой – начинал проявляться только при высоких концентрациях (10 мг/л). Результаты исследования показывают, что в замкнутых популяциях, находящихся на грани исчезновения, даже небольшие сдвиги в половой дифференциации, спровоцированные климатическими изменениями или загрязнением среды обитания эндокринными дизрапторами, могут привести к быстрому вымиранию биосообщества.

В. В. Стрекопытов

Свидетельства недавней эволюции мутаций отдельных человеческих популяций

Evidence for recent, population-specific evolution of the human mutation rate. Kelley Harris. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3439–3444.

Анатомически современные люди покинули Африку менее 200 000 лет назад и с тех пор населили все пригодные для жизни места. Разные условия обитания, включающие различные воздействия солнечной мутагенной радиации, привели к расхождениям фенотипов. Люди в умеренных широтах приобрели светлую кожу, относительно прозрачную для УФ лучей. Локальные изменения терпела и их ДНК. Это позволило предположить, что различные популяции испытали воздействие различных селективных факторов, повлиявших на целостность генома. Автор сопоставляет вариации мутаций между популяциями, используя редкие сегрегационные SNP-маркеры, появившиеся в качестве новых мутаций относительно недавно. Материалом исследования стали 1000 геномов из геномной базы данных. Несмотря на то, что результаты исследования не выявили четкого механизма возникновения мутаций, они не оставили сомнений в том, европейская популяция недавно испытала увеличение частоты мутаций определенного типа. Сравнение SNP-маркеров, индивидуальных для популяций Африки, Азии и Европы, показало, что в индивидуальную европейскую вариацию добавилась мутация 5'-TCC-3'→5'-TTC-3' и несколько других мутаций C→T. Мутаций C→T, 28% которых составляют мутации TCC→T, являются соматическими мутациями, характерными для меланомы. Меланома связана не только с воздействием УФ излучения, но и с европейским происхождением, что подтверждается низким уровнем данного заболевания среди

африканцев, afroамериканцев и даже более светлокотких азиатов. Исследования калифорнийского ракового регистра показали, что ежегодное количество случаев заболевания меланомой на 100 000 человек составило 0,8–0,9 для азиатов, 0,7–1,0 для afroамериканцев и 11,3–17,2 для европейцев. До конца не ясна связь мутации TCC→T с воздействием УФ излучения, но имеют место два фактора: 1) способность ультрафиолета образовывать сшивки TC, приводящие к базовым поражениям димера и 2) ухудшенное восстановление мутаций TCC по сравнению с другими участками, где могут формироваться патологические изменения, связанные с УФ облучением. Несмотря на явные свидетельства того, что УФ вызывает мутации TCC→T, непонятно, как УФ может воздействовать на клетки зародышевой линии, защищенные от солнечной радиации. Возможным объяснением является способность УФ вызывать мутации зародышевой линии не напрямую, а опосредованно, разрушая фолат – совместно действующий фактор синтеза ДНК, который требуется во время деления клетки. Дефицит фолатов вызывает повреждение ДНК, приводя к врожденным дефектам и сниженной мужской фертильности. Поэтому уменьшение количества фолатов может вызвать мутации, наблюдаемые в облученных УФ клетках. Такие же мутации могут появиться в зародышевой линии светлокотких людей, испытывающих дефицит фолатов после солнечного воздействия. Кроме того, различный уровень метаболизма в биологических видах может вызывать широтные перепады скорости молекулярной эволюции. Вне зависимости от причин, вызывающих мутации, их появление свидетельствует о том, что точность воспроизведения ДНК была нестабильной и могла измениться множество раз с начала нашей недавней эволюционной истории.

Н. Ю. Колесникова

TALE-никаза-опосредованный нокин гена *SP110* наделяет скот повышенной устойчивостью к туберкулезу

TALE nickase-mediated *SP110* knockin endows cattle with increased resistance to tuberculosis. Haibo Wu, Yongsheng Wang, Yan Zhang, Mingqi Yang, Jiaxing Lv, Jun Liu, Yong Zhang. PNAS. 2015. Published ahead of print March 2, 2015, doi:10.1073/pnas.1421587112.

Туберкулез крупного рогатого скота (известный также как «бычий туберкулез» или «жемчужная болезнь») — заболевание, вызываемое микобактерией *Mycobacterium bovis*. Оно может поражать не только животных, но и людей, которые с ними работают. В Великобритании, по данным Департамента окружающей среды, продовольствия и сельского хозяйства (DEFRA), в 2010–2011 гг. меры против туберкулеза крупного рогатого скота потребовали 152 млн. фунтов стерлингов. Наиболее остро проблема стоит в развивающихся странах, где не проводится обязательная пастеризация молока и отсутствует должный ветеринарный контроль на фермах. Авторы провели опыты по созданию 23 генетически модифицированных телят, 13 из которых дожили до взрослого возраста. При этом был использован метод редактирования генома, известный под на-

званием TALEN, который позволяет ученым удалять гены и вставлять на их место другие с высокой степенью точности. В лабораторных исследованиях на клеточных культурах было установлено, что *Mycobacterium bovis* размножается гораздо медленнее в присутствии иммунных клеток коров, в которые был внесен ген *SP110* из генома устойчивых к туберкулезу мышей. При дальнейших экспериментах на животных ученые внесли бактерию в легкие трех телят, получивших мышинный ген, и трех телят из контрольной группы. В результате, из трех генетически модифицированных животных одно не заболело совсем, а у двух других болезнь проявилась в значительно более слабой степени, чем в контрольной группе, где у заболевших животных развились тяжелые поражения легких, печени и селезенки. При втором тесте число телят в основной и контрольной группах было увеличено до девяти. На этот раз из генетически модифицированных телят шесть не заболели совсем, а у трех заболевание протекало в более легкой форме. Побочных эффектов появления гена *SP110* у телят исследование не выявило. Данный метод не позволяет создать коров, полностью невосприимчивых к инфекции туберкулеза, но он повышает общую устойчивость к заболеванию, что приводит к замедлению распространения инфекции и уменьшению числа случаев туберкулеза.

В. В. Стрекопытов

Окситоцин предотвращает действие этанола на δ -содержащие рецепторы $GABA_A$ и ослабляет вызванные этанолом двигательные нарушения у крыс

Oxytocin prevents ethanol actions at δ subunit-containing $GABA_A$ receptors and attenuates ethanol-induced motor impairment in rats. Michael T. Bowen, Sebastian T. Peters, Nathan Absalom, Mary Chebib, Inga D. Neumann, Iain S. McGregor. PNAS. 2015. Vol. 112. No 10. P. 3104–3109.

Даже небольшие дозы алкоголя могут вызвать двигательные нарушения. Это связано с вызываемым этанолом потенцированием действия гамма-аминомасляной кислоты (GABA) на extrasynaptic δ -субъединицу $GABA_A$ -рецептора (δ - $GABA_A$ Rs). Проблемы с координацией возникают из-за того, что молекулы этилового спирта связываются с δ - $GABA_A$ Rs на поверхности нейронов. За эти белковые выросты цепляется главный «тормозной» гормон нервной системы — GABA, заставляющий нейроны снизить активность.

По этой причине алкоголь оказывает на человека расслабляющее и успокаивающее действие. Авторы исследования попытались помешать этанолу «захватить» $GABA_A$ -рецепторы, вводя в организм крыс различные вещества, в том числе и окситоцин, которые или подавляют работу этих выростов, или же мешают спирту сцепляться с ними. Инъекции окситоцина крысам делали прямо в головной мозг. Доза, которую вводили животным, в 150 тыс. раз превышала естественный уровень этого гормона в их организме. После укола животным давали алкоголь в большом количестве (эквивалентном примерно 1 л вина для человека), однако это никак не сказывалось на их координации. Исследователи отмечают, что это может быть связано с блокирующим эффектом, который окситоцин оказывает на рецепторы δ - $GABA_A$ Rs — одни из основных тормозных медиаторов в нервной системе хордовых. По мнению специалистов, уже в ближайшее время возможно создание противоалкогольных препаратов для людей на основе этого гормона. Главным недостатком окситоцина является то, что он не может предотвращать последствий приема очень больших доз алкоголя.

В. В. Стрекопытов

Хадальная биосфера — взгляд на микробиологическую экосистему самых глубоких частей океана

Hadal biosphere: Insight into the microbial ecosystem in the deepest ocean on Earth. Takuro Nunoura, Yoshihiro Takaki, Miho Hirai, et. al. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. E1230–E1236.

Несмотря на то, что микробиологические исследования осадочных отложений хадальных (ультраабиссальных) зон океана начались еще в 1950-х гг., биосфера самых глубоких частей океана (глубже 6000 м) изучена пока крайне слабо. Бездна Челленджера, расположенная в юго-западной части Марианской впадины, — самая глубоководная область Мирового океана, ее средняя глубина составляет 11 км. Авторы провели изучение микробиологических сообществ всего водного столба Бездны Челленджера — от поверхности до дна впадины (10257 м). Образцы воды отбирались в ходе трех погружений дистанционно-управляемого аппарата *ABISMO*. В

результате, на ультраабиссальных глубинах (6000–10257 м) была обнаружена абсолютно новая микробиота, обогащенная гетеротрофными нитрификаторами, существенно отличающаяся от абиссального микробиологического сообщества. Конечно, ультраглубинная хемолитотрофная популяция не такая обильная, как микробиота вышележащих слоев, но нитрификаторы хадальных глубин лучше приспособлены к высокому потоку донорных электронов, чем абиссальные микроорганизмы. Были зафиксированы четкие границы зон обитания для основных ультраглубинных таксонов, не пересекающихся с зонами обитания менее глубинных популяций. Авторы считают, что обособленность хадальной микробиоты Бездны Челленджера связана с геоморфологическими особенностями этой части Марианской впадины, в частности, — с ее гидротопографической изоляцией, осложняющей эндогенный рециклинг биовещества. Четкая стратификация хадальных водных масс придонной части впадины может быть связана и с их относительно высокой соленостью.

В. В. Стрекопытов

Белок Atg13 с помощью домена HORMA вовлекает Atg9-содержащие везикулы в процесс образования аутофагосомы

Atg13 HORMA domain recruits Atg9 vesicles during autophagosome formation. Sho W. Suzuki, Hayashi Yamamoto, Yu Oikawa, Chika Kondo-Kakuta, Yayoi Kimura, Hisashi Hirano, Yoshinori Ohsumi. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3350–3355.

Аутофагия представляет собой консервативный среди эукариотических клеток процесс деградации клеток. Во время этого процесса в цитоплазме возникает по форме похожая на чашку структура, которая расширяется, при этом разрушая компоненты цитоплазмы. В конечном итоге, происходит образование аутофагосомы. Далее происходит слияние аутофагосомы с внутриклеточной структурой (вакуоли в дрожжах и растениях; лизосомы у метазоа), которая осуществляет разрушение содержимого аутофагосомы. Индукция процесса аутофагии происходит в ответ на недостаток пищи и является необходимым условием для выживания клеток при голодании. Роль процесса аутофагии во внутриклеточном обновлении белков и органелл, процессах развития, противодействия процессу старения, освобождению от патогенов и презентации антигенов на клетках иммунной системы была продемонстрирована во многих работах. Ранее, в клетках дрожжей было идентифицировано 38 белков, связанных с процессом аутофагии (Atg-белки). Было показано, что 19 из них, классифицируемых на шесть функциональных групп, имеют прямое отношение к аутофагии, вызванной голоданием. Эти белки включаются в процесс аутофагии в иерархическом порядке и образуют структуру, предшествующую аутофагосоме (PAS-структуре), которая необходима для ее формирования.

Показано, что белок Atg13 играет основную роль в формировании структуры PAS. В его структуре различают N-концевой домен HORMA (Hop1, Rev7, Mad2) и C-концевой разупорядоченный участок. Было показано, что C-концевой участок необходим для образования иницирующего комплекса Atg1, а N-концевой домен HORMA также крайне необходим для процесса аутофагии, однако его роль не была установлена. В настоящей работе авторы показали, что домен HORMA белка Atg13 участвует в связывании белка Atg9. С помощью мутационного анализа авторы показали, что именно взаимодействие этих белков ответственно за привлечение Atg9-содержащих везикул. Так, мутантные формы белка Atg13, у которых отсутствовал домен HORMA, были неспособны взаимодействовать с белком Atg9 и нарушали локализацию Atg9-содержащих везикул в структуре PAS. В результате это приводило к нарушению процесса аутофагии, вызванной голоданием. Таким образом, в настоящей работе авторами было показано, что белок Atg13 играет ключевую роль не только в инициации образования структуры PAS, но также и на следующем этапе образования каркаса структуры PAS. Основываясь на полученных результатах, авторы высказали предположение, что два различных структурных участка белка Atg13 играют ключевую роль на различных этапах образования аутофагосомы. На первом этапе белок Atg13 образует каркас предшественника аутофагосомы с помощью своего C-концевого разупорядоченного участка. Затем этот белок рекрутирует цитоплазматические везикулы, содержащие Atg9, посредством своего N-концевого домена HORMA. Установление ключевых игроков процесса аутофагии будет способствовать разработке лекарств, точно воздействующих на этот процесс.

И. М. Мохосоев

Существенные характеристики отоакустической эмиссии являются общими у четвероногих и предполагают общность механизма ее возникновения

Salient features of otoacoustic emissions are common across tetrapod groups and suggest shared properties of generation mechanisms. Christopher Bergevin, Geoffrey A. Manley, Christine Koppl. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3362–3367.

Многие фундаментальные вопросы биофизики, относящиеся к механике внутреннего уха, остаются без ответа. Внутреннее ухо относительно недоступно для эксперимента, что приводит к большой неопределенности результатов. Единственная особенность, относительно которой существует общее согласие, это нелинейность передаточной характеристики внутреннего уха, которая способствует обнаружению слабых звуков. Она сводит широкий диапазон громкости звуков к узкому диапазону амплитуд передаваемых колебаний. Проявлением этого процесса как раз и является отоакустическая эмиссия (ОАЭ), звуки которой можно измерить неинвазивно во внешнем ухе, используя чувствительный микрофон. ОАЭ возникает самопроизвольно, либо стимулируется извне. Все классы позвоночных в различной степени демонстрируют ОАЭ, биологическое происхождение которой до сих пор неясно. В статье анализируются как спонтанная, так и стимулированная ОАЭ у птиц (сипуха, *Tyto alba*) и у ящериц (североамериканский красногорлый анолис, *Anolis carolinensis*). Строение внутреннего уха этих видов очень различно, также оно отличается от строения внутреннего уха млекопитающих, что дает возможность найти общие биомеханические принципы генерации ОАЭ. Самопроизвольная ОАЭ является доказательством активного уси-

ления звука. Не все млекопитающие имеют ОАЭ, в то же время несколько классов живых существ, не являющиеся млекопитающими, ее имеют. У человека ОАЭ велика, но лишь у здорового уха. Явление ОАЭ у человека имеет важное клиническое применение: педиатрическую аудиологию. Внутреннее ухо разных видов позвоночных содержит от 50 до 20 000 волосковых сенсорных клеток. Сипуха известна своей выдающейся способностью охотиться, ориентируясь лишь на слух. Строение уха и особенности поведения этого вида хорошо изучены. Слуховой нерв сипухи демонстрирует средний частотный диапазон, но сильную фазовую синхронизацию на частотах до 10 кГц. Более того, распределение нейронов вдоль базилярной мембраны (в отличие от органа Корти млекопитающих) не является экспоненциальным, с явным усилением высоких (5-10 кГц) частот. Роль волн, распространяющихся по базилярной мембране, остается неясной. Внутреннее ухо ящерицы существенно отличается от птичьего или человеческого. Оно содержит всего 150 сенсорных клеток. Ориентация волосков сенсорных клеток взаимно противоположная. Имеется доказательство отсутствия бегущей волны на базилярной мембране. Однако важные характеристики ОАЭ внутреннего уха ящерицы аналогичны птичьим и человеческим. У всех позвоночных живых организмов имеется общий механизм генерации ОАЭ, несмотря на разницу в строении ушной улитки. ОАЭ возникает из-за когерентности фазы системы связанных осцилляторов, то есть волосковых сенсорных клеток, и не требует образования бегущей волны, характерной для уха млекопитающих. Сравнение задержки ОАЭ с откликом нервного волокна сипухи подтверждает точку зрения, что большинство отоакустических явлений можно определить как настройку тракта передачи звукового раздражения в центральную нервную систему.

И. Ю. Лещанский

Белок остеобластов Lrp4 препятствует формированию костей и способствует биогенезу остеокластов и перестройке костей

Lrp4 in osteoblasts suppresses bone formation and promotes osteoclastogenesis and bone resorption. Lei Xiong, Ji-Ung Jung, Haitao Wu, Wen-Fang Xia, Jin-Xiu Pan, Chengyong Shen, Lin Mei, Wen-Cheng Xiong. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3487–3492.

Как известно, нормальная масса костей поддерживается за счет равновесия активности остеобластов и остеокластов. При заболеваниях, связанных с увеличением костной массы, например, склеростозе и болезни Ван Бухема, были обнаружены мутации бека Lrp4 из семейства рецепторов LDL. Каким образом Lrp4 регулирует гомеостаз костей до сих пор не установлено. В данном исследовании показано, что введение нулевого аллеля Lrp4 с сохранением экспрессии только в скелетных мышцах, или мутация, специфичная для остеобластов, приводят к усиленному формированию костной ткани и нарушению ее перестройки. При введении нулевого аллеля с экспрессией Lrp4 в скелетных мышцах у мышей срастались пальцы, но это не влияло на их жизнеспособность. Длинные кости мутантов имели белый цвет, вероятно, из-за сниженного содержания костномозговых клеток. Микрокомпьютерная томография бедренных костей трехмесячных мутантных мышей с нулевым аллелем или заблокированной экспрессией Lrp4 в остеобластах выявила уменьшение костномозговых полостей и увеличение объемной доли компактного и губчатого вещества. Толщина губчатого вещества также увеличилась, но снизилось число образующих его трабекул. При этом у мышей с нокаутом гена Lrp4 в остеокластах этих дефектов не наблюдалось: напротив, объем

трабекул и толщина губчатого вещества были снижены. С помощью флуоресцентных маркеров формирования костей кальцеина и ализарина красного удалось выявить повышение скорости формирования костной ткани и повышения отношения минеральной поверхности к костной в не декальцифицированных участках бедренных и больших берцовых костей месячных мутантных мышей. Роль утраты Lrp4 в развитии костной ткани подтвердилась и при окрашивании формирующихся остеоидов мышей различных возрастов по методу Гольднера. У мышей с нулевым аллелем в возрасте 1 месяца наблюдалось увеличение числа остеоидов на единицу поверхности кости. У мышей с нокаутом в остеобластах эта тенденция оставалась незначительной до возраста 3 месяцев. При утрате функции Lrp4 в сыворотке крови снижался уровень дезоксиридинолина — маркера рассасывания костной ткани, и повышался уровень склеростина — важнейшего взаимодействующего с Lrp4 фактора гомеостаза массы костей. Также нокаут Lrp4 в остеобластах прекратил ингибирование Wnt/ β -катенинового сигнального пути, необходимого для остеобластной дифференцировки и поддержания гомеостаза костной ткани, и остеобластную дифференцировку стромальных клеток костного мозга под действием склеростина *in vitro*. Эта мутация препятствовала активации рецептора RANKL — ключевого фактора биогенеза остеокластов — склеростином, что снижало отношение уровня RANKL к уровню его антагониста остеопрogerина. В клетках, лишенных Lrp4, уровень экспрессии RANKL был значительно понижен и наблюдался некоторый избыток остеопрogerина. Полученные данные указывают на роль Lrp4 как рецептора склеростина в ингибировании Wnt/ β -катенинового сигнального пути и формирования костной ткани. Результаты исследования объясняют ряд патофизиологических механизмов развития заболеваний, связанных с увеличением костной массы.

А.Л. Братцева

Причины эпидемии ВИЧ-1 группы О у западных равнинных горилл

Origin of the HIV-1 group O epidemic in western lowland gorillas. Mirela D'arca, b, Ahidjo Ayoubaa, Amandine Esteban, et. al. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. E1343–E1352.

Современная классификация выделяет два вида вирусов, вызывающих иммунодефицит у человека: ВИЧ-1 и ВИЧ-2. За подавляющее большинство случаев заболевания СПИДом ответственность несет ВИЧ-1, который, в свою очередь, подразделяется на четыре группы: М (main — «основная»), вирусы этой группы вызывают 90% случаев СПИДа, О (outlier — «непохожий»), N (non-M, non-O — «ни М, ни О») и Р. По данным предыдущих исследований, вирусы ВИЧ-1 групп М и N попали к людям от двух различных популяций шимпанзе на юге Камеруна. Источники групп О и Р до последнего времени оставались неизвестными. Авторы изучили образцы

вируса иммунодефицита обезьян (SIV), распространенного в различных популяциях горилл, проживающих на территории Камеруна, Габона, демократической республики Конго и Уганды. Генетический материал вируса был получен из собранных образцов фекалий. Исследование охватило представителей трех подвидов: западных равнинных горилл (*Gorilla gorilla gorilla*), горных горилл (*Gorilla beringei beringei*) и восточных равнинных горилл (*Gorilla beringei graueri*). Ученые определили четыре места в Камеруне, где в популяциях западных равнинных горилл циркулировал вирус SIV. Две линии этого вируса оказались генетически близки к группам О и Р вируса ВИЧ-1. Это означает, что именно от западных равнинных горилл данные вирусы перешли к людям. Таким образом, было впервые показано, что вирус SIV горилл способен пересекать видовой барьер и передаваться человеку. Ранее эта способность признавалась только для вирусов шимпанзе (источник ВИЧ-1 групп М и N) и черных мангабеев (источник ВИЧ-2).

В. В. Стрекопытов

Всеобъемлющий анализ разнообразия гетеротримерного комплекса G-белков и их взаимодействий в растворе с рецепторами

Comprehensive analysis of heterotrimeric G-protein complex diversity and their interactions with GPCRs in solution. Matthias Hillenbrand, Christian Schori, Jendrik Schöppe, Andreas Plückthun. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. E1181–E1190.

Связанные с G-белками рецепторы (GPCR) представляют собой большой класс эукариотических рецепторов, характерной особенностью которых является образование в мембране семи трансмембранных участков. В геноме человека эти белковые рецепторы кодируются более чем 800 генами. При стимуляции огромным набором лигандов с различной химической структурой, GPCRs регулируют многие клеточные ответы путем активации гетеротримерных белков, связывающих гуаниновые нуклеотиды. Гетеротримерный комплекс G-белков образуется из пула белков, образованного 16 α -субъединицами, 5 β -субъединицами и 12 γ -субъединицами. До сих пор нет детального анализа образования комплекса $G\alpha\beta\gamma$, однако существует мнение, что большинство комбинаций $G\alpha\beta\gamma$ способны образовывать функциональный комплекс. Связывание агонистов с GPCRs запускает каскады передачи сигнала, в которых G-белки являются основными участниками. В настоящее время эти рецепторы являются мишенями для примерно 30% всех лекарств. В то же время, основным препятствием для разработки новых лекарств является ограниченное знание о конформационных изменениях, вызываемых связыванием с молекулой агониста, детали взаимодействия рецепторов с различными G-белками. К настоящему моменту для различных G-белков и некоторых рецеп-

торов G-белков известны кристаллические структуры. В то же время, есть только одна работа, в которой представлена структура комплекса β_2 -адренергического рецептора и $G\alpha_s\beta_1\gamma_2$, демонстрирующая взаимодействие между GPCR и G-белком. Было обнаружено, что α -субъединица является основным взаимодействующим партнером GPCR. Тем не менее, до сих пор не ясно как GPCR выбирает между различными α -субъединицами и как димер $\beta\gamma$ оказывает влияние на это взаимодействие. В настоящей работе авторы поставили целью выявить комбинации субъединиц G-белка, которые показывали бы наиболее эффективное взаимодействие с мутантными формами рецептора NTR1. С этой целью был проведен скрининг природного пула G-белков, состоящих из субъединиц α_i1 - или α_sL и всех возможных димеров $\beta\gamma$, образующих гетеротримерный G-белок, и изучено их взаимодействие с солюбилизованными мутантными формами рецептора нейротензина 1 (NTR1). Было показано, что комбинации субъединиц подобно $\alpha_i1\beta_2\gamma_1$, которые рассматривались ранее как несуществующие, в действительности существуют и могут быть очищены. Новые обнаруженные комбинации субъединиц входят в число комбинаций, которые лучше других образуют комплекс между NTR1 и гетеротримерным G-белком. Также было показано, что мутантные формы GPCR, демонстрирующие слабое связывание с G-белком, тем не менее, способны формировать комплекс GPCR/G-белок. По результатам работы авторы высказали предположение, что комбинации стабильной мутантной формы GPCR и тщательно отобранных комбинаций субъединиц G-белка представляют собой перспективный подход для стабилизации этого внутренне динамического белкового сигнального комплекса, который может быть использован для проведения детальных структурно-функциональных исследований.

И.М. Мохосев

Обработка информации, получаемой от терморепрецепторов, в мозге дрозофилы

Thermosensory processing in the *Drosophila* brain. Wendy W. Liu, Ofer Mazor, Rachel I. Wilson. Nature. 2015. Vol. 519. No 7543. P. 353–357.

Простейшей моделью обработки данных о температуре является тот факт, что тепловые терморепрецепторы дают информацию только о нагреве, в то время как холодовые — только об охлаждении. Авторы исследовали явление так называемой «иллюзии решетки гриль» (когда чередующиеся холодные и горячие объекты дают ощущение обжигающей боли) в термочувствительной системе дрозофил. Визуальным скринингом приблизительно 7000 Gal4-линий мушек (Gal4 — белок-активатор, управляющей экспрессией зеленого флуоресцирующего белка) были выделены те, которые отметили центральные нейроны с дендритами в проксимальном антеннальном протоцеребруме и аксонами, спроецированными в высших отделах мозга. Поскольку периферические терморепрецепторы находятся в антенне, тепловой стимул создавался управлением температурой раствора, протекающего через антенну. Обнаружено 2 типа проекционных нейронов (PN), которые возбуждались охлаждением и тормозились потеплением. Отличие этих типов заключалось в скорости приспособления к устойчивому понижению температуры. Эти холодовые PN имеют дендриты, которые связаны с аксонами холодовых терморепрецепторов. Идея такой простой схемы формирования связей была усилена дополнительными экспериментами. В отличие от представления охлаждения авторы обнаружили, что представление потепления

опосредуется относительно более сложной схемой. Блокируя синаптическое ингибирование, деполяризованные тепловые PN (третий тип) могут быть субъектами тонического торможения. Примечательно, что мутация в гене теплового рецептора Gr28b.d не нарушает возбуждающие ответные реакции на потепление в этих PN. Основываясь на этих результатах, авторы предположили, что нейронный путь информации о холоде может возбудить нейроны дикого типа в ответ на потепление через растормаживание. Мутация в тепловых рецепторах может изменить схему обработки информации, либо существуют другие рецепторные молекулы, которые могут опосредовать ответные реакции в тепловых рецепторах, когда мутация Gr28b.d отсутствует. Небольшие колебания температуры (± 1 °C) дают более глубокое представление о путях, которые обеспечивают входной сигнал к тепловым PN. Четвертый и последний тип PN, который авторы определили, возбуждался путем и охлаждения, и потепления. Примечательно, что вызванное потеплением возбужденное состояние сохраняется у таких тепло-холодовых PN при мутации гена Gr28b.d, как наблюдалось и у тепловых PN. Эти данные предсказывают, что в мозге есть тормозные нейроны, которые тонически активны, тормозятся потеплением и возбуждаются охлаждением. Большинство изученных авторами тормозных нейронов (14 из 17) как раз соответствовали данным параметрам. Некоторые особенности ответных реакций PN объясняются моделью, где холодовые PN тормозят тепловые и тепло-холодовые PN, что, однако, может помочь нейтрализовать нетермическую активность (шум). Таким образом, результаты указывают на асимметрию в обработке тепловых и холодовых стимулов.

Н. В. Карпов

Нарушение иерархического прогностического кодирования во время сна

Disruption of hierarchical predictive coding during sleep. Melanie Strauss, Jacobo D. Sitt, Jean-Remi King, Maxime Elbaz, Leila Azizi, Marco Buiatti, Lionel Naccache, Virginie van Wassenhove, Stanislas Dehaene. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 1353–1362.

Авторы исследовали, используется ли прогностическое кодирование (фундаментальное свойство мозга), во время сна. Установлено, что в этот период слуховые стимулы (в данном случае одиноким гласные) продолжают поступать в кору и распознаваться. Во время бодрствования ранние перцептивные реакции в слуховой коре головного мозга обнаруживаются. Однако во время сна демонстрируется, что ответная реакция мозга на более длительный фактор новизны внезапно исчезает вместе с потерей восприимчивости. Исчезновение P300 (позитивного событийно-связанного потенциала с латентным периодом в 300 мс) по принципу «все или ничего» происходит уже в первую стадию сна, когда испытуемые находятся между состояниями реагирования и нереагирования. У «реагирующих» субъектов выявляются специфические паттерны на магнитоэнцефалограмме и волны P300 на электроэнцефалограмме, в то время как у «нереагирующих» этого уже не наблюдалось. Первая стадия медленного сна рассматривается здесь как процесс перехода от бодрствования ко сну, характеризующийся смешением сознательных и бессознательных состояний в периоды подавления альфа-активности. Сохраняющиеся ранние (< 300 мс) и переходные компоненты слуховой обработки вызывались только девиантными стимульными последовательностями,

которые ранее были слышны сознательно во время бодрствования. Предполагается, что, хотя спящему мозгу и не удалось обнаружить новую стимульную последовательность во время сна, он остается в состоянии обнаруживать отклонения от целиком узнаваемой последовательности, слышимой перед сном неоднократно. Реакция рассогласования (MMR) присутствует во время сна только частично. Локализация негативности рассогласования подтверждена в первичной слуховой, лобной и оперкулярной коре. Предполагается, что она является специфической для промежуточного временного окна MMR. Многомерные классификаторы, обученные во время промежуточного пика рассогласования, смогли распознать локальные отклонения во время бодрствования. Несмотря на разрушение маркеров прогностического кодирования во время сна, небольшое восстановление реакций мозга все же наблюдалось. Авторы действительно показали, что ранние MMR локализируются почти исключительно в звуковых областях как во время бодрствования, так и сна. Поздние реакции были также локализованы в слуховой коре во время сна, но в период бодрствования активации распространялись более широко по коре головного мозга. Показано, что сохранение сенсорной адаптации к искаженным звукам особенно велико для тех стимулов, которые еще никогда не предъявлялись перед сном по сравнению со звуками, которые уже предъявлялись. В целом результаты показывают, что кора головного мозга продолжает обрабатывать звуковые раздражители во время сна и адаптироваться к ним, однако два компонента мозговой деятельности, связанные с иерархическим прогностическим кодированием, — промежуточный и поздний этапы слуховой обработки — исчезают во время сна.

Н. В. Карпов



Медицина

Бум миопии. Близорукость достигает размеров эпидемии. Некоторые ученые считают, что нашли причины

The myopia boom. Short-sightedness is reaching epidemic proportions. Some scientists think they have found a reason why. Elie Dolgin. Nature. 2015. Vol. 519. No 7543. P. 276–278.

Восточная Азия охвачена беспрецедентным ростом близорукости. В США и Европе подобная ситуация в настоящее время затрагивает около половины молодых людей. Это вызвало бурный рост исследований, пытающихся понять причины расстройства. Много лет ученые утверждали, что близорукость в основном зависит от генов. Современный рост близорукости у детей во многих странах является следствием постоянного взаимодействия с экранами компьютеров и смартфонов при чтении и учебных занятиях. Исследователи подтверждают тесную связь между уровнем

образования и миопией. Эксперименты на животных подтвердили, что хороший свет защищает зрение. Ученые же пытались объяснить, как яркий свет может предотвратить близорукость. На основании эпидемиологических исследований некоторые специалисты считают, что для профилактики близорукости дети должны проводить около 3 часов в день при уровне освещенности в 10 000 лк. В одной из школ южной части Тайваня преподаватели отправляли детей на улицу на 80 минут во время их перерыва между занятиями, после чего был отмечен положительный эффект. Автор считает, что необходимо ввести в школах дополнительное пребывание на воздухе для учеников. В некоторых регионах дети не могут получить достаточную дозу наружного освещения по причине того, что или солнце слишком интенсивное или слишком холодно. Но глазные капли нельзя рассматривать в качестве альтернативы по сравнению с отправкой детей на улицу, которая имеет много других преимуществ помимо пользы для глаз.

Н. В. Карпов

Столбнячный токсин и CCL3 повышают эффективность вакцин из дендритных клеток у мышей и пациентов с глиобластомой

Tetanus toxoid and CCL3 improve dendritic cell vaccines in mice and glioblastoma patients. Duane A. Mitchell, Kristen A. Batich, Michael D. Gunn, Min-Nung Huang, Luis Sanchez-Perez, Smita K. Nair, Kendra L. Congdon, Elizabeth A. Reap, Gary E. Archer, Annick Desjardins, Allan H. Friedman, Henry S. Friedman, James E. Herndon II, April Coan, Roger E. McLendon, David A. Reardon, James J. Vredenburgh, Darell D. Bigner, John H. Sampson. Vol. 519. No 7543. P. 366–369.

Более чем в 90% случаев глиобластомы pр65 экспрессируется, но отсутствует в нормальной ткани мозга, окружающей опухоль. Стимуляция дендритных клеток пациента *ex vivo* РНК pр65 может использоваться для получения вакцинного клеточного препарата для введения тому же пациенту с целью иммунотерапии рака. Подготовка к инъекции повышает активность миграции клеток из места инъекции к лимфатическим узлам. Сравнение двух методов подготовки места инъекции было проведено в группе больных глиобластомой. В место планируемого введения вакцины из активированных дендритных клеток пациенты получали предварительные инъекции нестимулированных дендритных клеток или столбнячно-дифтерийного токсина, стимулирующего воспаление. У пациентов, получивших предварительную инъекцию столбнячно-дифтерийного токсина, аккумуляция дендритных клеток в дренирующем месте введения лимфатических узлов была более выраженной, возрастала общая и безрецидивная выживаемость. Была отмечена связь активности иммунного ответа против pр65 и миграции дендритных клеток в лимфатические узлы с выживаемостью пациентов. Для более подробного исследования данного явления мышам были введены дендритные клетки

после стимуляции РНК овальбумина и инъекции столбнячно-дифтерийного токсина. Введение токсина мышам стимулировало миграцию дендритных клеток как в дренирующие лимфатические узлы, так и в лимфатические узлы, расположенных симметрично им, что говорит о системном эффекте столбнячно-дифтерийного токсина. Истощение популяции CD4⁺ Т-клеток снижало активность миграции дендритных клеток, а при предварительном введении активированных CD4⁺ Т-клеток эффект, наоборот, усиливался. Как у пациентов, так и у модельных животных, в ответ на столбнячно-дифтерийный токсин повышалось содержание CCL3 в сыворотке. Его источником служили клетки кожи в месте введения, и этот процесс регулировался CD4⁺ Т-клетками. Активированные столбнячно-дифтерийным токсином CD4⁺ Т-клетки не могут стимулировать миграцию дендритных клеток у животных с мутациями в гене *Ccl3*. Введение экзогенного CCL3 восстанавливает способность дендритных клеток к миграции. Активирующий эффект зависит от CD4⁺ Т-клеток и вырабатываемого под их действием хозяином CCL3, при этом в отсутствие хемокина CCL3 Т-клетки не могут активировать миграцию дендритных клеток. Накопление CCL21 в коже и лимфатических узлах в ответ на инъекцию столбнячно-дифтерийного токсина у мышей с мутацией *Ccl3* снижено, но также может быть восстановлено введением CCL3. В эксперименте на мышах с пересаженными клетками меланомы, экспрессирующими овальбумин, удалось замедлить развитие опухоли введением столбнячно-дифтерийного токсина и дендритных клеток, сенсibilизированных овальбумином, при мутации *Ccl3* и утрате экспрессии CCL21 в лимфатических узлах остановить рост опухоли таким путем не удавалось. Таким образом, использование столбнячно-дифтерийного токсина повышает эффективность иммунотерапии активированными дендритными клетками при глиоме. CD4⁺ Т-клетки, CCL3 и CCL21 участвуют в осуществлении этого процесса.

А. Н. Ваганова

Ингибирование лактатдегидрогеназы аналогами стирипентола для лечения эпилепсии

Targeting LDH enzymes with a stiripentol analog to treat epilepsy. Nagisa Sada, Suni Lee, Takashi Katsu, Takemi Otsuki, Tsuyoshi Inoue. *Science*. 2015. Vol. 347. No 6228. P. 1362–1367.

От эпилепсии страдает приблизительно 1% населения планеты. Устойчивые к лекарствам формы данного заболевания можно сдерживать специальными диетами, потому что возбуждение нейронов регулируется энергетическим метаболизмом. Например, при использовании так называемой кето-диеты, характеризующейся высоким содержанием жиров и низким содержанием углеводов, мембранные потенциалы в нейронах изменяются вследствие метаболического перехода с глюкозы на кетоновые тела. Авторами сообщается также, что судороги и эпилептиформная активность способны

уменьшаться путем ингибирования лактатного метаболического пути, а именно его ключевого фермента — лактатдегидрогеназы (ЛДГ), компонента челночного механизма между астроцитами и нейронами. Ингибирование ЛДГ вызывает гиперполяризацию нейронов, а также подавляет *in vivo* периодические эпилептические приступы в каинатной мышинной модели. Иными словами, ЛДГ является молекулярной мишенью для подавления эпилепсии. Были исследованы клинически используемые противоэпилептические препараты, которые снижают активность ЛДГ, в частности — стирипентол. Изменяя его химическую структуру, авторы открыли ранее неизвестные ингибиторы ЛДГ, которые мощно подавляют приступы эпилепсии. Более того, химическая структура стирипентола не имеет никакого отношения к другим антиэпилептическим препаратам. Авторы пришли к выводу, что ингибиторы ЛДГ являются новой перспективной группой противоэпилептических препаратов, которые подавляют излишнюю нейронную и судорожную активность.

Н. В. Карпов

Проблемы «гормона сжигания жира»

Woes for 'exercise hormone'. Kelly Servick. *Science*. 2015. Vol. 347. No 6228. P. 1299.

Еще в 2012 г. казалось, что проблема ожирения решена. Новую веху в лечении нарушений обмена веществ открыл гормон, названный в честь греческой богини Ириды, вестницы богов. Bruce Spiegelman, клеточный биолог Гарвардской медицинской школы в Бостоне, описывал иризин, обнаруженный в мышцах мышей после тренировки, как белок FNDC5, превращающий белый жир (запасной) в бурый жир (энергетически сжигаемый). Однако последние исследования ставят под вопрос роль иризина в метаболизме человека. Ген, кодирующий FNDC5, имеет необычный порядок запуска ДНК у разных животных, из чего сделан вывод, что

исследования на мышах вряд ли справедливы для человека. James Timmons, системный биолог Королевского колледжа в Лондоне, доказал отсутствие связи между FNDC5 и физическими упражнениями у людей. Harold Erickson, биохимик из Университета Дьюка (Дарем, штат Северная Каролина), экспериментально подтвердил неэффективность стандартного иммуноферментного анализа (ИФА). Spiegelman подчеркивает, что не все предыдущие исследования иризина у людей полагаются на ИФА, например, в исследованиях Francesco Celi, эндокринолога Университета Содружества Вирджинии в Ричмонде, использовалась более сложная техника масс-спектрометрии. Открытие новых веществ, представляющих потенциальный интерес, как правило, сопровождается поспешным внедрением анализов, что не всегда оправдано. Однако многие уже поставили крест на исследованиях этого гормона.

Е. М. Степанова

Производство «медицинской» марихуаны набирает обороты в лабораториях США

Marijuana gears up for production high in US labs. Sara Reardon *Nature*. 2015. Vol. 519. No 7543. P. 269–270.

Резиденты 23 американских штатов могут купить медицинскую марихуану для лечения, но научным работникам приходится преодолевать бюрократические препоны, чтобы получить наркотическое сырье для исследований. Единственный поставщик марихуаны для научных целей — Национальный институт по исследованию наркотической зависимости (National Institute on Drug Abuse, NIDA) — производит очень слабые сорта марихуаны по сравнению с теми, которые продаются на улицах. В 2014 г. институт увеличил траты на исследования марихуаны на 50%. Ежегодное производство марихуаны на ферме Миссисипского Университета, откуда и идет вся марихуана, выросло с 18 до 600 кг, а урожай, собранный в конце прошлого года, включает в себя два новых штамма. Продукт имеет низкое содержание тетрагидроканнабинола (ТНС), активного элемента марихуаны, но высокий уровень каннабидиола, вещества, которое, по утверждению, дает терапев-

тический эффект. Второй штамм имеет относительно сбалансированный уровень этих двух химических веществ. Тем не менее, ученые не могут исследовать терапевтический эффект доступной людям марихуаны, купленной на улице, или в медицинских центрах, так как пользуются только материалом от NIDA. Быстрое развитие высокоточных отраслей медицины тоже снижает популярность исследования растений. Кроме того, стоимость продукции NIDA оказывается выше, чем у частных поставщиков, работающих для центров распределения в штатах, легализовавших терапевтическую марихуану. Возможным решением многогранной проблемы исследования медицинского применения марихуаны может послужить пример Канады. В апреле 2014 г. канадское правительство разрешило частным фирмам подавать заявки на лицензию для производства марихуаны в научных целях. За год было выдано 16 лицензий. Многообразие производителей позволяет ученым получать доступ к разным сортам растения. Такая система позволяет продуктивно сотрудничать. Если подобная модель будет принята в США, то лабораторные исследования марихуаны получат новый импульс, а монополия NIDA будет обречена.

С. Ю. Перфильева

Редкие варианты генов нейрональной возбудимости влияют на риск биполярного расстройства

Rare variants in neuronal excitability genes influence risk for bipolar disorder. Seth A. Ament, Szabolcs Szelinger, Gustavo Glusman, et. al. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P3576–3581.

Биполярное аффективное расстройство (БАР) – тяжелое и неизлечимое психиатрическое заболевание, которое проявляется в виде маниакальных и депрессивных аффективных состояний. Для маниакальных эпизодов характерны повышенное или раздраженное настроение, идеи величия, беспорядочность мыслей, ускоренная речь; для депрессивной фазы – подавленное настроение, сниженная энергия, бессонница, отсутствие аппетита. БАР поражено около 2% населения США, причем при отсутствии лечения до 15% больных погибают от суицида. 60-80% риска возникновения БАР определяются наследственностью. Полногеномный поиск ассоциаций обнаружил воспроизводимую ассоциацию БАР с несколькими генетическими маркерами. К ним относится область последовательности, кодирующей потенциал-зависимый кальциевый канал, CACNA1C, а также регион синаптического белка анкирина 3 (ANK3). В целом, около 25% наследственного риска заболевания БАР определяется обычной генетической вариативностью. Дополнительный риск БАР может быть ассоциирован с нераспространенными (<5%) и редкими (<1%) вариантами генов. Для проверки гипотезы о том, что редкие варианты влияют на риск возникновения БАР, авторы секвенировали геномы 200 человек из 41 семьи европейского происхождения с многочисленными случаями БАР. Из каждой семьи были секвенированы

геномы от 2 до 17 человек. Авторы выбрали 3 стратегии выявления моно- и олигогенетических эффектов: сравнение близкородственных больных; больных, разделенных несколькими мейозами; пар, различающихся в отношении БАР. В качестве контроля анализировали геномы 254 человек из здоровых семей европейского происхождения. Прежде всего были проверены 3087 кандидатных генов с известными синаптическими функциями или гены, вклад которых в БАР был ранее доказан в полногеномном поиске ассоциаций. Авторы показали, что геномы в семьях с БАР несут повышенное число редких вариантов генов, кодирующих нейрональные ионные каналы, в том числе, субъединицы рецепторов ГАМК_A и потенциал-зависимых кальциевых каналов. Кроме того, ассоциация с БАР выявлена для 4 редких кодирующих и регуляторных вариантов, в том числе миссенс-мутации в альфа-6 субъединице ГАМК_A рецептора. Направленное секвенирование 26 из кандидатных генов еще у 3014 больных и 1717 контрольных индивидуумов подтвердило ассоциацию БАР с редкими вариантами генов, кодирующих ANK3, кальциевые каналы N-типа (CACNA1B) и L-типа (CACNA1C, CACNA1D), CaM киназа II альфа (CAMK2A) и фактор роста нервов (NGF). Как для генеалогий, так и для когортных сравнений «случай–контроль» влияние на риск БАР редких вариантов в промотерных областях, а также в 5' и 3' нетранслируемых регионах было сильнее, чем в кодирующих последовательностях. Таким образом, авторы подтвердили вклад редких генетических вариантов в риск заболевания БАР. Связанные с риском БАР гены и каскады регулируют разнообразные аспекты нейрональной возбудимости, причем большинство из них являются некодирующими последовательностями с регуляторными функциями.

А. А. Тиунова

Специфичность к антигену, вероятно, не связана с эффективностью и распределением иммуноцитоклинов

Antigen specificity can be irrelevant to immunocytokine efficacy and biodistribution. Alice Tzeng, Byron H. Kwan, Cary F. Opel, Tejas Navaratna, K. Dane Wittrup. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3320–3325.

Цитокиновая терапия способна активировать эффективный противоопухолевый ответ, однако побочные токсические эффекты этих препаратов часто вынуждают ограничить дозу. Для устранения побочных эффектов и направленного воздействия на опухоли были разработаны комплексы цитокинов и антител–иммуноцитоклинов. Тем не менее, полностью устранить побочное действие цитокиновых препаратов таким образом не удалось. В данном исследовании на подкожной B16F10-меланоме мышей было показано, что использование нетоксичных доз иммуноцитоклина TA99-IL-2, образованного интерлейкином IL-2 и специфичными к меланоме антителами, в сочетании с дополнительной дозой антител против опухоли подавляет опухолевый рост в большей степени, чем стандартная иммуноцитоклиновая терапия. С помощью флуоресцентного маркирования и поточной цитометрии опухолевых клеток было показано, что разработанный комплекс более эффективно проникает в опухоли. Иммуноцитоклин без дополнительных антител связывал менее 2% опухолевых клеток. Примечательно, что антитела без IL-2 связывались с большим числом клеток. Таким образом, присутствие IL-2 препятствует насыщению опухоли антителами, причем связывание с опухолью является необходимым, но недостаточным условием подавления опухолевого роста. Кроме того, TA99-IL-2 с дополнительными антителами вызывал более силь-

ные, чем стандартный иммуноцитоклин, цитокиновые ответы в опухолях, в частности, наблюдался более высокий уровень экспрессии хемокинов MIP-2, IP-10 и MIG, привлекающих эффекторные клетки с противоопухолевой активностью. TA99-IL-2 с дополнительными антителами связывался, главным образом, с экспрессирующими рецептор IL-2 NK- и NKT-клетками и циркулирующими дендритными клетками. В крови и селезенке связывалось большее количество иммуноцитоклина, чем в опухолевом микроокружении. Примечательно, что антигенспецифичность иммуноцитоклинов и взаимодействия Fcγ-рецепторов, по-видимому, не являются необходимыми для эффективного распределения препаратов в организме. Иммуноцитоклины, направленные на отсутствующую у мышей антигена, или с инактивирующими мутациями в Fc-доменах обладали тем же характером действия и распределения в организме, что и специфичные к опухоли иммуноцитоклины. Все эти наблюдения позволяют предположить, что локализация иммуноцитоклинов определяется в большей степени взаимодействием IL-2 и его рецептора, чем узнаванием антигена антителами. Математическая модель поведения иммуноцитоклинов с антителами в укороченной и полноразмерной форме показала, что размер иммуноцитоклина также является важным фактором направленного действия на антиген. Иммуноцитоклины меньшего размера, согласно модели, более эффективно связывались в опухоли и, в отличие от крупных комплексов, постоянно активных и в опухоли, и в крови, достигали высокой активности в опухоли без нежелательной активности в крови. Таким образом, в данной работе описан прямой надежный способ повышения эффективности иммуноцитоклинов, а также показана неизвестная ранее роль факторов, влияющих на распределение цитокинов в организме.

А. Л. Братцева

Чувство кворума селективно запускает экспрессию белков в клетках *Salmonella* в опухоли

Quorum-sensing *Salmonella* selectively trigger protein expression within tumors. Charles A. Swofford, Nele Van Dessel, Neil S. Forbes. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3457–3462.

Штаммы *Salmonella*, секретирующие противоопухолевые белки могут применяться для лечения рака, но неспецифическая экспрессия подобных соединений создает риск повреждения здоровых тканей. Эти бактерии активно проникают в опухолевую ткань и колонизируют ее. При этом накопление бактерий в опухоли в 10 000 превышает накопление в здоровых тканях. Контроль экспрессии противоопухолевого белка за счет системы чувства кворума может помочь сделать ее опухолеспецифичной. Система чувства кворума *lux* включает два компонента: LuxI, отвечающий за синтез аутоиндуктора N-3 (оксогексаноил) гомосеринлактона (3OC6HSL), и транскрипционный регулятор LuxR, активирующийся в его присутствии. При малой плотности популяции 3OC6HSL свободно выводится из клетки, а при ее повышении остается в клетке, где стимулирует LuxR. Высокая плотность бактерий предотвращает диффузию аутоиндуктора и стимулирует в системе чувство кворума. Чтобы оценить экспрессию этих генов в сальмонеллах, в аттенюированный штамм сальмонелл был введен вектор, содержащий гены системы чувства кворума и флуоресцентный репортер GFP. В качестве модельных животных применялись мыши с опухолями молочной железы. Методом иммунофлуоресценции оценивалось содержание бактерий в тканях и экспрессия репортерной системы. В культуре экспрессия репортера GFP активировалась при концентрации бактерий $0,5 \times 10^8$ КОЕ/мл, в

то время как контрольный штамм с конститутивной экспрессией репортерного белка GFP синтезировал его независимо от плотности культуры. Через 53 часа после введения мышам, бактерии колонизировали опухоль, формируя скопления, где накапливался флуоресцентный репортер. На основании полученных данных процесс активации чувства кворума был представлен в виде математической модели. Потенциальная доля активируемых колоний зависела от расстояния между колониями и плотности популяции. При плотности 0.11×10^{10} КОЕ/г зависимость доли колоний с активированной системой чувства кворума от расстояния до соседних колоний была обратно пропорциональной, но при более низких значениях плотности какой-либо связи не наблюдалось. Критическое расстояние до ближайшей колонии, требующееся для активации чувства кворума составляло 155 мкм. При малом расстоянии снижалась также зависимость от плотности, напротив, при низкой плотности активация чувства кворума не зависела от взаимного расположения колоний. Накопление бактерий в печени составляло 1.51×10^4 КОЕ/г, бактерии были пространственно распределены в ткани. Поскольку эта плотность популяции значительно ниже критической, система чувства кворума не активируется. В культуре система чувства кворума активировалась при плотности популяции 10^8 КОЕ/мл, но в опухоли для этого нужна концентрация бактерий 11×10^8 КОЕ/мл из-за замедленной диффузии аутоиндуктора. Применение системы чувства кворума для регуляции экспрессии терапевтического белка позволяет использовать такие агрессивные белки, как α -гемолизин *Staphylococcus aureus* для лечения опухолей. Бактерии обеспечивают длительную экспрессию терапевтического белка, которая не специфична к опухолевым маркерам и не требует внешней стимуляции.

А. Н. Ваганова

Нейронауки и психология

Возрастание склонности к «блуждающему разуму» при использовании транскраниальной микрополяризации

Increasing propensity to mind-wander with transcranial direct current stimulation. Vadim Axelrod, Geraint Rees, Michal Lavidor, Moshe Bar. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3314–3319.

«Блуждающему разуму» свойственно появление мыслей, не связанных с выполнением какой-либо задачи. Согласно некоторым данным, человек может проводить в этом состоянии существенную часть периода бодрствования. В отличие от других когнитивных процессов «блуждающий разум» возникает непроизвольно и характеризуется внутренней направленностью. Считается, что подобное отвлечение играет значимую роль во многих психических функциях, среди которых планирование будущего и творческое мышление. Важно определить возможность модификации этого внутреннего процесса путем внешней стимуляции, установить роль лобных долей и исполнительных систем в данном явлении. Ранее для изучения этого состояния в основном использовался метод функциональной магнитно-резонансной томографии, который не позволяет установить причинную связь между «блуждающим разумом» и каким-то конкретным участком мозга. Поэтому авторами исследования был выбран метод транскраниальной микрополяризации (анод — на левой дорсолатеральной префронтальной коре мозга, катод — на правой супраорбитальной области). Было проведено 2 эксперимента, состоящих из 2 частей каждый — с применением стимуляции и без. Испытуемым (45 человек) было предложено выполнить задание на сосредоточение внимания, во время которого необходимо было нажимать кнопку клавиатуры при появлении на экране любой цифры, не совпадающей с це-

левым значением. Такое монотонное задание часто используется в исследованиях о «блуждающем разуме», т.к. оно провоцирует возникновение мыслей, не относящихся к заданию. Участников эксперимента также просили оценить интенсивность появления такого рода мыслей. Первый эксперимент с внутригрупповым планом показал, что по сравнению с ложным воздействием стимуляция префронтальной коры мозга увеличивает склонность к появлению мыслей, не связанных с заданием. Выявлено возрастание склонности к «блуждающему разуму» и во 2-й части 1-го эксперимента — без стимуляции. Однако 1-й эксперимент не смог установить обусловленность возникновения данного процесса, т.к. в нем не менялись места стимуляции. Для этого провели 2-й эксперимент с межгрупповым планом, в котором к стимуляциям префронтальной коры и ложному воздействию добавился новый контрольный участок — затылочная доля. Выявлено, что склонность к мыслям, не относящимся к заданию, значительно выше при префронтальной стимуляции, чем при 2 других видах воздействия. Именно стимуляция префронтальной коры, а не ложное воздействие, увеличивает склонность к мыслям на отвлеченные темы. Это не является следствием широкого влияния транскраниальной микрополяризации, т.к. стимуляция затылочной доли не дала такого эффекта. Обнаружено, что склонность к не относящимся к задаче мыслям возрастает при стимуляции лобных долей без ухудшения выполнения внешних задач. Таким образом, «блуждающий разум» может регулироваться извне, и лобные доли играют в этом состоянии важную роль. Впрочем, полученные данные не означают, что лобные доли — единственный участок мозга, задействованный в появлении отвлеченных мыслей. Результаты поддерживают идею о большом значении исполнительных систем в настоящем процессе.

С. А. Завалишина

Моделирование процессов консолидации памяти после обучения, задействовавшего мозжечково-вестибулярный путь

Modeling memory consolidation during posttraining periods in cerebellar vestibular learning. Tadashi Yamazaki, Soichi Nagao, William Lennon, Shigeru Tanaka. PNAS. V. 115. No 11. P. 3541–3546.

Явление долговременной депрессии на синапсах параллельных волокон к клеткам Пуркинье в мозжечке, предположительно, лежит в основе обучения моторным навыкам. Однако можно предположить, основываясь на недавно полученных данных, что в основе формирования такой памяти лежит пластичность, как клеток мозжечка, так и вестибулярных ядер. Чтобы проверить такую возможность, в данной работе была разработана простая модель мозжечка, реализующая явление долговременной депрессии и явление долговременной потенциации на синапсах параллельных волокон

к клеткам Пуркинье и на синапсах мшистых волокон к нейронам вестибулярных ядер. С помощью этой модели изучали адаптацию оптокинетического глазодвигательного рефлекса. Модель воспроизводила несколько важных аспектов предварительно полученных экспериментальных результатов у генетически модифицированных мышей, с избирательным подавлением либо долговременной потенциации, либо долговременной депрессии на параллельных волокнах мозжечка. Оказалось, что приобретенная после часовой тренировки адаптация данного рефлекса приводит к формированию кратковременной памяти на синапсах параллельных волокон к клеткам Пуркинье, и эта память исчезает в течение дня. Ежедневная тренировка постепенно формирует долговременную память, которая поддерживается на синапсах мшистых волокон к нейронам вестибулярных ядер. Полученные результаты позволяют предположить, что процессы консолидации приобретенной памяти происходят после окончания тренировки.

О. Е. Сварник

Принципы кодирования канонической кортикальной микросети в мозге птиц

Coding principles of the canonical cortical microcircuit in the avian brain. Ana Calabrese, Sarah M. N. Woolley. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3517–3522.

Когнитивные способности птиц позволяют предположить, что мозг птиц обладает сложной системой обработки информации. Исследования последних лет показали, что врановые (вороны, грачи и сойки) способны изготавливать инструменты, узнавать себя в зеркале, планировать будущее, используя недавний опыт, могут распознавать сложные образы, различают цифры и делают это на уровне приматов. Певчие птицы, такие как зебровые амадины (*Taeniopygia guttata*), обучаются воспроизводить и распознавать сложные вокализации для социальной коммуникации, и эта способность имеет ряд параллелей с обучением и воспроизведением речи у человека. Считается, что в основе сложного поведения млекопитающих лежат прогрессивные изменения кодирующих свойств нейронов каждого из шести слоев неокортекса, связанных общей или «канонической» микросетью, которая управляет потоком информации между слоями. Птицы не имеют шестислойной коры, однако они демонстрируют сложное поведение и когнитивные способности. Последние анатомические исследования свидетельствуют, что соседние регионы паллиума птиц гомологичны слоям неокортекса. Кроме того, проекции между регионами слуховой коры птиц сопоставимы с найденными в неокортексе. Основываясь на данных о значительных когнитивных навыках птиц и параллелях в анатомическом строении переднего мозга птиц и млекопитающих, авторы предположили, что регион A1 паллиума птиц проявляет —

на уровне отдельных нейронов и популяций клеток — принципы кодирования, которые характерны для канонической кортикальной микросети в неокортексе млекопитающих. В данном исследовании была осуществлена регистрация групп слуховых нейронов (от 2 до 38 клеток одновременно) в поверхностных ($n = 219$), средних ($n = 94$) и глубоких ($n = 237$) областях первичной слуховой коры у шести самцов зебровых амадин. Анализ особенностей спонтанной и вызванной импульсной активности этих нейронов показал, что слуховая кора птиц демонстрирует те же принципы обработки информации, что и каноническая кортикальная микросеть, развитая, как полагали ранее, только у млекопитающих. Во-первых, соседние и связанные между собой отделы слуховой коры птиц формируют иерархию обработки информации, что характерно и для неокортекса млекопитающих. Во-вторых, у птиц, как и у млекопитающих, обнаружены два класса нейронов: возбуждающие основные клетки с регулярной разрядной активностью относительно низкой частоты и тормозные интернейроны с потенциалами действия высокой частоты. В-третьих, нейроны в неокортексе и в слуховой коре птиц демонстрируют сходные стратегии кодирования (как для одиночных нейронов, так и их популяций) по отделам коры, между типами нейронов. Таким образом, полученные данные обеспечивают функциональное доказательство сходства кортикальных микросетей у млекопитающих и птиц. По мнению авторов статьи, гомология кортикальных микросетей у птиц и млекопитающих позволяет предположить, что каноническая кортикальная микросеть была развита у их общего предка, что обеспечивает физиологическое объяснение эволюции нейрональных процессов, которые лежат в основе сложного поведения в отсутствие слоистого строения коры мозга.

С. В. Зворыкина

Влияние эпигенетической модификации гена OXTR на восприятие злости и страха

Epigenetic modification of the oxytocin receptor gene influences the perception of anger and fear in the human brain. Meghan H. Puglia, Travis S. Lillard, James P. Morris, Jessica J. Connelly. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3308–3313.

Окситоцин участвует в нейрогуморальной регуляции функций желудочно-кишечного тракта, репродуктивной и сердечно-сосудистой системы. Этот нейропептид также является одним из наиболее релевантных биомаркеров социального и эмоционального поведения человека. Он влияет на некоторые сложные социальные и аффективные процессы (например, аффилиативное поведение, забота и стрессовая реактивность). Также окситоцин вовлечен в механизмы социального познания, такие как доверие, зависть и ментализация (рефлексивная репрезентация самости). Ген рецептора окситоцина (OXTR) кодирует пептид, отвечающий за восприимчивость к окситоцину. Метилирование ДНК гена OXTR (модификация без изменения нуклеотидной последовательности) оказывает непосредственное воздействие на транскрипцию гена и фенотипическую изменчивость. Влияние таких изменений на особенности социального поведения индивида еще до конца не изучены. Гипотеза исследования была основана на предположении влияния изменчивости, вызванной метилированием гена OXTR, на процессы социальной перцепции, в частности, на процесс восприятия эмоционального выражения лица. Под контролем функциональной магнитно-резонансной томографии (МРТ) определялась нейронная активность у испытуемых в ответ на узнавание эмоций по выражению лица. В ходе исследования были взяты образцы крови для эпигенетического анализа у 98 человек евро-

пеоидного типа. Исследования были сосредоточены главным образом на выявлении общих версий гена, таких как однонуклеотидные полиморфизмы гена OXTR (single nucleotide polymorphisms, SNPs). Выявлена связь SNPs гена OXTR со структурными изменениями в окситоцинергических (вырабатывающих окситоцин) отделах мозга. Путем визуализации эпигенетической модификации, была установлена взаимосвязь метилирования гена OXTR с нейронной активностью, возникающей в ответ на восприятие эмоций человеческого лица. Высокий уровень метилирования гена OXTR наблюдался одновременно с увеличением суммарной активности в отделах мозга, связанных с лицевыми и эмоциональными процессами. При проведении МРТ внимание уделялось таким областям мозга, как миндалевидное тело, веретенообразная (латеральная затылочно-височная) извилина, островковая доля головного мозга (инсулярная область) и др. В ходе исследований обнаружено, что высокий уровень метилирования гена OXTR сопряжен со снижением функциональных связей миндалины с отделами мозга, участвующими в эмоциональной регуляции и оценке аффективных реакций. Иными словами, эндогенный окситоцин связан с ослаблением реакции страха. Интраназальное введение окситоцина приводит к аналогичным результатам, речь идет об анксиолитическом эффекте препарата окситоцина при восприятии негативных эмоций злости и страха. Полученные данные освещают преимущества эпигенетического подхода к определению эндогенного окситоцина, которые заключаются в неинвазивности метода и способности прогнозировать индивидуальную изменчивость. А также укрепляют центральную позицию окситоцина в процессах социального познания, позволяя лучше раскрыть тонкости взаимодействия внутренних процессов организма человека с его социальной жизнью.

Е. М. Степанова

Сеть нейронов моторной коры, опосредующая планирование действия и движение

A motor cortex circuit for motor planning and movement. Nuo Li, Tsai-Wen Chen, Zengcai V. Guo, Charles R. Gerfen, Karel Svoboda. *Nature*. 2015. V. 519. No 7541. P. 51–56.

Моторная кора является критической для планирования и осуществления произвольных движений. Активность в моторной коре предсказывает специфические движения за секунды до того, как они совершаются, но как такая подготовительная активность связана с последующим движением, остается неясным. В данной работе исследовался переход подготовительной активности в движение в хорошо структурированной сети нейронов моторной коры у мышей. Мыши, мягко фиксированные за голову, должны были дискриминировать расположение объектов при помощи вибрисс, и в зави-

симости от положения объекта начинать лизать воду из левой или правой поилки. Хотя передняя латеральная часть моторной коры содержит равные пропорции нейронов, предсказывающих ипсилатеральные или контралатеральные движения, унилатеральное подавление активности этой структуры во время планирования движений нарушало контралатеральные движения. В данной работе было также показано с использованием клеточно-специфической электрофизиологии, клеточной визуализации и оптогенетических воздействий, что нейроны V слоя данной структуры, имеющие внутрикорковые проекции, имеют четкую латерализацию. Смещение активности в сторону контралатеральной популяции возникает специфично только в тех нейронах V слоя, которые имеют проекции в ствол мозга, и только на поздних стадиях планирования движений. Эти результаты демонстрируют трансформацию распределенной подготовительной активности в конкретные команды движений в иерархически организованных нейронных сетях моторной коры.

О. Е. Сварник

Метаболическая регуляция эпилептической активности

Metabolic control of epilepsy. Helen E. Scharfman. *Science*. 2015. Vol. 347. No 6228. P. 1312–1313.

Эпилептические припадки являются результатом чрезмерной и аномальной активности нейронов в мозге. Было высказано предположение, что противосудорожные препараты оказывают влияние на структуры, участвующие в генерации потенциалов действия (ионные каналы) и контролирующие синаптическую передачу (рецепторы нейромедиаторов). Это подтверждает мысль, что в центре внимания при поиске новых препаратов должны быть нервные клетки. Считается также, что эпилептикам полезна так называемая кетогенная диета, которая главным образом состоит из жиров и включает мало углеводов. Однако по поводу эффективности такой диеты есть некоторые разногласия.

Ученые сообщают, что судороги могут контролироваться не только возбудимыми элементами нервной системы, но и метаболическими. Показано, что ингибирование лактатдегидрогеназы (ЛДГ), фермента, имеющего решающее значение в метаболических перекрестных связях между астроцитами и нейронами, способно блокировать характерное для припадков избыточное возбуждение нейронов. Доказательством служило сокращение пирувата в культуре нейронов (результат дегидрирования лактата). Не менее убедительной является и комплексная регистрация электрической активности, когда активность ЛДГ экспериментально регулировалась в одиночных клетках, парах нейронов и астроцитов, а также в мышечной модели эпилепсии. Путем ингибирования данного фермента оказывает свое фармакологическое действие стирипентол, один из имеющихся в настоящее время противосудорожных препаратов. Эффективность лечения им была продемонстрирована на грызунах.

Н. В. Карпов

Стохастическое замолкание вызывает корреляцию нейронов корковых сетей

Stochastic transitions into silence cause noise correlations in cortical circuits. Gabriela Mochol, Ainhoa Hermoso-Mendizabal, Shuzo Sakata, Kenneth D. Harris, Jaime de la Rocha. *PNAS*. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3529–3534.

Спайковая активность корковых нейронов может сильно варьировать. Вариабельность, как правило, коррелирует среди близлежащих нейронов — этот эффект обычно интерпретируется как следствие коактивации нейронов с общими анатомическими входами. Недавние исследования, однако, указывают на то, что корреляция может динамически модулироваться. В данной работе исследуется гипотеза о том, что корреляция обусловлена нейронной коинактивацией: короткими периодами молчания, когда все нейроны в локальной сети прекращают разряжаться. В эксперименте записывали спонтанную и вызванную стимула-

ми активность первичной слуховой коры наркотизированных крыс, используя силиконовые микроэлектроды. При спонтанной активности снижение корреляции, сопровождающей состояние десинхронизации мозга, во многом объяснялась уменьшением «плотности» периодов молчания. Презентация стимула вызывала первоначальное падение уровня корреляции и последующее его восстановление. Была построена сетевая модель со случайными переходами между молчащим и активным аттрактором, основанная на предположении о том, что нейроны разряжаются в соответствии с распределением Пуассона. Вариации внешнего входа изменяли коэффициент перехода к молчащему аттрактору и воспроизводили отношение между корреляцией и «плотностью» периодов тишины в условиях спонтанной и вызванной активности. Это позволяет предположить, что наблюдаемые изменения корреляции, происходящие постепенно в различных состояниях мозга или же резко при сенсорной стимуляции, связаны с изменением вероятности временного прекращения спайковой активности в нейронных микросетях.

Д. Р. Галимова

Инсулинорезистентность головного мозга влияет на оборот дофамина и приводит к поведенческим расстройствам

Insulin resistance in brain alters dopamine turnover and causes behavioral disorders. Andre Kleinridders, Weikang Cai, Laura Cappellucci, Armen Ghazarian, William R. Collins, Sara G. Vienberg, Emmanuel N. Pothos, C. Ronald Kahn. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3463–3468.

Люди, страдающие диабетом I и II типа, в большей степени подвержены риску развития когнитивных и поведенческих расстройств. Ранее было показано, что инсулин способен оказывать влияние на передачу сигналов в мозге и регулировать нейрональную пластичность. В данной работе изучается вопрос о том, каким образом потеря инсулиновых рецепторов в мозге может вызвать поведенческие изменения. Обнаружено, что мыши, нокаутные по гену инсулинового рецептора в мозге (NIRKO мыши), с возрастом более часто демонстрируют признаки тревоги и депрессии. Это связано с нарушением митохондриальных функций, повышением экспрессии моноаминоксидаз (MAO A и B) на внешней мембране митохондрий и, как следствие, усилением катаболизма дофамина в мезолимбической системе. В поведенческих тестах участвовали две группы NIRKO мышей. Мыши в возрасте 10 месяцев не показали существенных отличий в поведении по сравнению с контрольной группой, а мыши в возрасте 17 месяцев продемонстрировали серьезные поведенческие расстройства в тестах на уровень тревожности и депрессии. Помимо этого у мышей NIRKO уже в раннем возрасте изменялась морфология митохондрий, уменьшался уровень белков в дыхательной цепи митохондрий, а, следовательно, и уровень базального дыхания. В связи с этим увеличивался уро-

вень окислительного стресса. В развитии депрессивных состояний играет роль уровень дофамина в стриатуме и мезолимбической системе. Было обнаружено, что к возрасту четырех месяцев у мышей NIRKO в два раза увеличивался уровень MAO A и в 1,3 раза — уровень MAO B в стриатуме. Следствием этого являлась усиленная деградация дофамина и снижение его функций. *In vitro* было показано, что увеличение уровня MAO A в мозге мышей NIRKO является прямым следствием потери инсулиновых рецепторов в нейронах и глиальных клетках. Применение антидепрессантов, которые нормализуют катаболизм дофамина и функцию митохондрий, благоприятным образом сказывалось на восстановлении поведенческих изменений у экспериментальных мышей. Потеря инсулинового сигналинга в мозге влияет на функции митохондрий по крайней мере тремя путями: (1) уменьшение митохондриальной активности вследствие снижения экспрессии белков электронно-транспортной цепи; (2) повышение уровня MAO вследствие утраты механизма инсулиновой супрессии генов MAO; (3) изменение морфологии митохондрий в мозге: уменьшение их размеров и возрастание числа. Остается неясным, почему дисрегуляция MAO выявлена у NIRKO мышей в стриатуме и прилежащем ядре, но не в префронтальной коре. Это может свидетельствовать о том, что разные отделы мозга по-разному реагируют на инсулин. Таким образом, невосприимчивость клеток головного мозга к инсулину является причиной нарушения оборота дофамина вследствие усиленной продукции MAO и связанных с этим возрастных поведенческих расстройств. Увеличение случаев депрессии у пациентов с диабетом может быть следствием центральной инсулинорезистентности. Разработка методов улучшения инсулинового сигналинга может представлять интерес для терапии аффективных расстройств у таких пациентов.

Д. Р. Галимова

Парвальбумин-экспрессирующие нейроны базальных отделов переднего мозга, имеющие кортикальные проекции, регулируют гамма-осцилляции в коре

Cortically projecting basal forebrain parvalbumin neurons regulate cortical gamma band oscillations. Tae Kim, Stephen Thankachan, James T. McKenna, James M. McNally, Chun Yang, Jee Hyun Choi, Lichao Chen, Bernat Kocsis, Karl Deisseroth, Robert E. Strecker, Radhika Basheer, Ritchie E. Brown, Robert W. McCarley. PNAS. V. 112. No 11. P. 3535–3540.

Гамма-осцилляции коры (30-80 Гц, типичная частота — приблизительно 40 Гц) опосредуют высшие когнитивные функции, такие, например, как интеграция признаков, внимание, рабочая память. Патологии гамма-осцилляций являются признаками нескольких психиатрических заболеваний, связанными с дисфункцией корковых быстро-разрядных интернейронов, содержащих кальций-связывающий белок парвальбумин. Гамма-осцилляции демонстрируют вариации в зависимости от уровня активности, модулируются

вниманием и коррелируют с процессами осознания. Какие именно типы подкорковых клеток лежат в основе гамма-осцилляций не вполне ясно. В данной работе изучалась роль ГАМК-эргических нейронов базальных отделов переднего мозга (зона опосредующая бодрствование), имеющих кортикальные проекции и содержащих парвальбумин. Было обнаружено, что волокна этих клеток контактируют с парвальбумин-экспрессирующими интернейронами коры, вовлеченными в генерацию гамма-осцилляций. Было также показано, что оптогенетическая стимуляция парвальбумин-содержащих нейронов базальных отделов переднего мозга мышей увеличивала мощность гамма-осцилляций посредством навязывания кортикальному осциллятору резонансной частоты в 40 Гц. Полученные данные показывают, что гамма-осцилляции в коре главным образом контролируются тормозными входами парвальбумин-содержащих нейронов базальных отделов переднего мозга. Таким образом, данные нейроны могут представлять собой терапевтическую мишень для лечения заболеваний, характеризующихся патологическими гамма-осцилляциями, например, шизофрениии.

О. Е. Сварник

Технологии и материалы

Совместное связывание CO₂ в диамин-содержащих металлоорганических структурах

Cooperative insertion of CO₂ in diamine appended metal-organic frameworks. Thomas M. McDonald, Jarad A. Mason, Xueqian Kong, et. al. Nature. 2015. Vol. 519. No 7543. P. 303–308.

На сегодняшний день уже имеется ряд технологий, разработанных специально для улавливания выбросов углекислого газа от дымовых труб и других источников, но многие из них имеют ограничение: чтобы утилизировать захваченный CO₂ для захоронения, требуется значительное количество энергии. Авторы разработали новый материал для улавливания углерода, который затем можно легко и быстро высвободить. Этот материал относится к виду композитов, изготовленных из металла и органических соединений, так называемых MOF (metal-organic frameworks) – пористых металлоорганических структур. В данном случае исследователи объединили Mg или Mn (в зависимости от

применения) и органические соединения азота на основе диаминов. Как и другие MOF, новый материал имеет пористую структуру с микроскопическими параллельными каналами. Молекулы углекислого газа связываются с этим материалом при прохождении загрязненного воздуха через каналы. Безусловно, при этом должны соблюдаться определенные параметры температуры (примерно 20–38 °С) и давления (которое зависит от типа используемого металла). Как утверждают авторы, с течением времени процесс фильтрации становится еще более эффективным, поскольку следующие молекулы CO₂, проходя по каналам, связываются с молекулами, которые уже попали в материал. После того, как материал становится полностью насыщенным углекислым газом, его нагревают до 50 °С, и происходит обратный процесс высвобождения молекул CO₂. Исследователи планируют тестировать новый материал в пилотном проекте на реальной электростанции. Они также надеются, что новый материал может быть использован для очистки воздуха на подводных лодках или даже на борту Международной космической станции.

В. В. Стрекопытов

Материалы, сочетающие распознавание, активацию, вычисления и коммуникацию

Materials that couple sensing, actuation, computation, and communication. M. A. McEvoy, N. Correll. Science. 2015. Vol. 347 No. 6228. P. 1328, 1261689-1–8.

Биологические системы часто демонстрируют тесную интеграцию сенсоров, исполнительных механизмов и вычислительных элементов, что позволяет живым организмам менять форму и внешний вид, адаптивно воспринимать нагрузку и распознавать сигналы в очень широком динамическом диапазоне. Искусственные приспособления, сделанные по примеру природных – крылья с изменяемым аэродинамическим профилем, маскирующиеся транспортные средства, мосты, обнаруживающие и ремонтирующие повреждение, реалистичную на ощупь и чувствительную к прикосновению кожу для роботов и протезов. Интерес к таким «программируемым материалам» каждый раз оживляется при появлении новых технологий, как это было с быстрой дискретной электроникой в 1970-х и микроэлектромеханическими системами – в 1990-х гг. За последнее время достигнутый прогресс в миниатюризации позволил уместить вычислительную мощность компьютера 1990-х в объем булавочной головки, что позволяет говорить о новом классе «роботизированных материалов». Современные стандартные композитные материалы позволяют включать в себя сенсоры и исполнительные механизмы во все большем количестве. Вместе с появившейся доступностью миниатюрных и дешевых микропроцессоров это могло бы позволить материалам функционировать автономно. Для достижения этой цели необходима тесная интеграция имеющих отношение к этой теме дисциплин. В настоя-

щее время существенный прогресс есть скорее внутри дисциплин, а не в области их интеграции. В области композитов есть большие успехи интеграции в материалы сенсоров и исполнительных устройств, а также в технологиях производства таких материалов. В области компьютерных наук развилась целая область распределенных алгоритмов сбора и обработки больших объемов информации с сетей сенсоров. Появились принципиально новые способы производства: трехмерная печать, получение объемных структур растяжением и раскладыванием двумерных композитных структур. В робототехнике есть большой прогресс в области управления роботов с многими исполнительными устройствами и распределенными сенсорами, а также в области непрерывной динамики. При этом пока есть очень мало примеров одновременного использования этих достижений для получения материалов, где, с одной стороны, сенсоры, исполнительные устройства, вычисления и связь были бы тесно интегрированы, а с другой – было бы возможно недорогое и массовое производство. «Роботизированные материалы» могли бы расширить функциональность классических «умных материалов», позволяя полностью программируемое и автономное изменение формы, жесткости, внешнего вида. При условии недорогого и массового производства, они могли бы добавить повседневно используемым предметам и поверхностям новый уровень функциональности, обеспечивая огромное поле новых применений. Практическая реализация такого подхода требует с одной стороны нового уровня взаимодействия инженерных и научных отраслей, а с другой – новой модели междисциплинарного образования, позволяющей сочетать ширину охвата информации, включающую все поле «роботизированных материалов» с глубиной освоения отдельных дисциплин.

А. В. Якименко

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: эффективный путь к высокопроизводительным транзисторам структуры «металл-оксид»

Spray-combustion synthesis: Efficient solution route to high-performance oxide transistors. Xinge Yu, Jeremy Smith, Nanjia Zhou, Li Zeng, Peijun Guo, Yu Xia, Ana Alvarez, Stefano Aghion, Hui Lin, Junsheng Yu, Robert P. H. Chang, Michael J. Bedzyk, Rafael Ferragut, Tobin J. Marks, Antonio Facchetti. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3217–3222.

Полупроводники, имеющие структуру вида «металл-оксид», особенно находящиеся в аморфном состоянии, проявили себя как подходящий материал для следующего поколения электронных приборов на основе тонких пленок. Для таких полупроводников характерны: высокая подвижность носителей (даже в аморфном состоянии), хорошая термостабильность, низкая стоимость и оптическая прозрачность. Последнее свойство делает их пригодными для плоских дисплеев, гибких печатных плат и фотоэлементов. Впечатляющий прогресс планарно-эпитаксиальных металл-оксидных полупроводниковых структур был достигнут с помощью таких технологий как золь-гель, глубокое ультрафиолетовое облучение, обработка наноструктур давлением, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). Тем не менее, из-за несовершенства технологии конденсации и уплотнения все еще не созданы металлооксидные пленки, достигающие технически достаточных толщин за одну технологическую операцию. Золь-гель процесс широко используется для выращивания металлооксидных пленок, в том числе и для высокопроизводительных пленочных транзисторов. Однако процессы конденсации, уплотнения и удаления примесей имеют типичные рабочие температуры 400–500 °С, которые несовместимы с недо-

рогим стеклом и обычными гибкими пластиковыми подложками. Значительное преимущество имеет золь-гель процесс для структур вида «индий-цинк-оксид», однако проблемы высокой температуры свойственны и ему. Здесь описан эффективный способ выращивания пленки оксида для получения структуры металл-оксид с помощью СВС при относительно невысоких температурах (300–400 °С). Способ является комбинацией СВС и покрытия распылением, что дает возможность изготавливать оксидные пленки необходимой толщины за одну технологическую операцию длительностью несколько минут. Непрерывная пленка получается как на кристаллических, так и на аморфных полупроводниках и проводниках, что дает возможность получать высокопроизводительные тонкопленочные полупроводниковые структуры. Способом СВС можно изготовить транзисторы на основе «индий-галлий-цинк». Таким способом были изготовлены однослойные планарные транзисторные структуры толщиной 50 нм. Их подвижность электронов, концентрация центров захвата, плотность пор, стабильность пленки оказались сравнимыми с параметрами напыляемых пленок. В лабораторных условиях пленку толщиной 50 нм из композиции «индий-галлий-цинк» можно вырастить за 20 минут. Эти результаты показывают потенциал применения СВС для микроэлектроники и тех областей, где нужны металлооксидные нанопленки. Для изготовления высокопроизводительной электроники с приемлемым качеством обычно требуются капиталоемкие технологии физического или химического осаждения паров. Такие дорогие методы используются для изготовления металлооксидных слоев тонкопленочных транзисторов (ТФТ). Поэтому развитие способов создания эпитаксиальных тонкопленочных транзисторов, не требующих процесса осаждения паров, является важным этапом в эволюции электроники на основе металлооксидных структур.

И. Ю. Лещанский

Структура сверхтвердого тетраборида вольфрама: пропущенное звено между MB_2 и высшими боридами MB_{12}

Structure of superhard tungsten tetraboride: A missing link between MB_2 and MB_{12} higher borides. Andrew T. Lech, Christopher L. Turner, Reza Mohammadi, Sarah H. Tolbert, Richard B. Kaner. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3223–3228.

По мере роста потребности в сверхтвердых материалах привлекают внимание многообещающие бориды металлов. Эта потребность вытекает из необходимости повысить эффективность режущего инструмента, поскольку часто применяемый карбид вольфрама не является сверхтвердым. Традиционные сверхтвердые составы имеют свои недостатки. Например, алмаз неприменим к обработке ферромагнитных материалов, а кубический нитрид бора дорог в изготовлении и ему трудно придать необходимую форму. Самые многообещающие кандидаты на роль сверхтвердых материалов — высшие бориды вольфрама, часто это WB_4 и, иногда, — $W_{1-x}B_3$. В быстро расширяющемся семействе сверхтвердых боридов особый интерес вызывает тетраборид вольфрама WB_4 . Он имеет исключительные механические свойства и недорого стоит по сравнению с ReB_2 , OsB_2 , RuB_2 , RhB_2 , куда входят металлы платиновой группы. Также тетраборид вольфрама демонстрирует очень высокую твердость при индентировании: примерно 43 ГПа по методу Виккерса и примерно 41,7 ГПа при наноиндентировании, а также может выдержать дифференциальное давление до 19,7 ГПа. Подобно ReB_2 , он способен царапать природный алмаз. Твердость этого вещества можно повысить созданием его твердых растворов в других переходных металлах. Здесь представ-

лена новая кристаллографическая модель такого состава, полученная методом дифракции нейтронов, причем влияние времени пролета нейтронов на картину дифракции исключено. Возможно это удивительно для простого двухкомпонентного вещества, но структура тетраборида вольфрама спорна со времени его открытия в 1961 году. Первоначально полагали, что структура атомной решетки тетрагональна. Сейчас предполагают не более четырех возможных структур этого вещества. Его структура имеет вид средний между полиморфическими типами боридов MB_2 и MB_{12} . $WB_{4,2}$ может содержать в себе большое число атомов примесей, и эти примеси значительно влияют на твердость даже при низкой их концентрации. По сравнению с предыдущими структурными анализами, основанными исключительно на рентгенографии, имеется сильное свидетельство присутствия внедренных в атомную решетку атомов бора и образования многогранной кристаллической структуры. Большинство узлов кристаллической структуры $WB_{4,2}$ заняты атомами вольфрама, но также в ней присутствуют тримеры бора. Эти тримеры образуют связи между слоями решетки, поскольку расстояния между слоями удобны для образования таких связей. Бор образует слегка искаженные кубооктаэдральные структуры. Эти структуры являются первичной конфигурацией, обеспечивающей исключительную твердость $WB_{4,2}$. Структура $WB_{4,2}$ является сверхтвердой и может служить прототипом большого количества твердых растворов, которые могут оказаться еще тверже. Возможно, более важно то, что исследование точной кристаллической структуры $WB_{4,2}$ может указать путь создания новых твердых растворов, обладающих свойствами сверхтвердости, и в дальнейшем привести к созданию нового поколения сверхтвердых материалов.

И. Ю. Лещанский

Термоэлектрический материал n-типа $Mg_2Sn_{0,75}Ge_{0,25}$ для выработки электроэнергии

n-type thermoelectric material $Mg_2Sn_{0,75}Ge_{0,25}$ for high power generation. Weishu Liu, Hee Seok Kim, Shuo Chen, Qing Jie, Bing Lv, Mengliang Yao, Zhensong Ren, Cyril P. Opeil, Stephen Wilson, Ching-Wu Chu, Zhifeng Ren. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. P. 3269–3274.

Термоэлектричество – производство электроэнергии на избыточном тепле – привлекает все больше внимания. Возможность увеличить эффективность использования топлива путем утилизации рассеиваемого тепла выгодна для автомобилей и многих других применений. Также солнечные термоэлектрические генераторы дают альтернативный способ превращения солнечной энергии в электрическую в дополнение к фотоэлектрическому способу. Термоэлектрический генератор можно рассматривать как тепловой двигатель, использующий электроны и дырки в качестве носителей энергии. КПД термоэлектрического генератора (ZT) зависит от КПД цикла Карно и среднего термоэлектрического КПД материала: $ZT = (S^2\sigma/\kappa) \times T$, где S – коэффициент Зеебека, σ – электропроводность, κ – теплопроводность, T – абсолютная температура. Высокий ZT достигается в основном уменьшением теплопроводности, для чего ищут новые материалы. Для практических применений важны не только КПД, но и плотность потока мощности (например, у солнечных источников энергии она высока), а также стоимость источника энергии (например, она невысока, если это – утилизируемое тепло). Желательно, чтобы значения ZT и коэффициента мощности не зависели от температуры во всем диапазоне рабочих температур от горячего конца цепи до холодного.

Однако все реальные материалы имеют сильную температурную зависимость. Рабочие температуры термоэлектрических материалов ограничиваются шириной запрещенной зоны E_g . Например, хорошо известный Bi_2Te_3 имеет $E_g = 0,13$ эВ и работает при температурах ниже 200 °C. Материалы на основе PbTe имеют повышенный ZT при температурах 400–600 °C благодаря большей величине $E_g = 0,32$ эВ. Однако из-за токсичности и малой механической прочности свинца их применение ограничено. Хотя сплавы Mg_2Si могут работать при температурах до 500 °C, а сплавы Гейслера – до 600–700 °C, но их $ZT < 1$ при температурах около 400 °C. Другие материалы, например полупроводники n-типа In_4Se_{3-8} и $Ba_8Ga_{16}Sn_{30}$, а также p-типа – $Zn_{4-8}Sb_3$, имеют высокие средние значения ZT (до 400 °C), однако низкий коэффициент мощности при этой температуре делает их неудобными для выработки электроэнергии. Соединения Mg_2Sn с точки зрения термоэлектрических применений исследованы хуже, чем аналогичные им соединения Mg_2Si , поскольку их ZT меньше. Большинство исследований касаются сплава Mg_2Si-Mg_2Sn с максимальным значением $ZT \approx 1$ при 500 °C. Недавно его ZT был увеличен до 1,1–1,3 уточнением значения X в твердых растворах вида $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$. Трудности в изготовлении этих материалов заключаются в высоком давлении паров и химической активности Mg. Путем разлома компонентов в шаровой мельнице и последующим горячим пресованием успешно синтезирован сплав $Mg_2Sn_{0,75}Ge_{0,25}$, показавший $ZT = 1,4$ при 450 °C и коэффициент мощности 55 мкВт/см·K⁻² при 350 °C. Вычисления показывают, что он может дать КПД 10,5% и плотность потока мощности 6,6 Вт/см² при $T_h = 400$ °C и $T_c = 50$ °C, что очень удобно, поскольку многие источники утилизируемого тепла и солнечные термоэлектрические генераторы имеют рабочие температуры до 400 °C.

И. Ю. Лещанский

Политипизм, полиморфизм и сверхпроводимость в $TaSe_{2-x}Te_x$

Polytypism, polymorphism, and superconductivity in $TaSe_{2-x}Te_x$. Huixia Luo, Weiwei Xie, Jing Tao, et al. PNAS. 2015. Vol. 112. No 11. E1174–E1180.

Политипизм имеет место в случае слоистых материалов и является разновидностью полиморфизма. Особенностью политипизма является изменение последовательности повторяющихся структурных слоев с сохранением их геометрии. При этом возрастает период в направлении перпендикулярном к слоям. Следствием структурных изменений является значительное различие физических свойств. В работе сообщается о результатах изучения структуры и сверхпроводящих свойств $TaSe_{2-x}Te_x$ – типичного слоистого дихалькогенида, при $0 \leq x \leq 2$. Структуры MX_2 этого типа (где M – переходный металл) отличаются большим числом полиморфных модификаций и давно вызывают интерес в связи с необычными электронными свойствами, обусловленными пониженной размерностью. Атомные связи в слоях X-M-X, где атомы M находится в тригональной призматической или октаэдрической координации с атомами X, являются сильными, а связи атомов X в соседних слоях являются слабыми (ван-дер-ваальсовыми). В гексагональных (H) и ромбоэдрических (R) модификациях атомы Ta упакованы в тригональном призматическом окружении в слоях Se-Ta-Se, упакованных вдоль оси c гексагональной или ромбоэдрической ячейки. Политипы 2H и 3R отличаются только периодом повторения (через 2 слоя в 2H и через три слоя в 3R). Имеется также тригональный политип 1T с периодом повторения

через один слой. Все эти структуры были синтезированы в ходе выполнения работы. Даже незначительное легирование танталом (при $x = 0,02$) превращает структуру 2H- $TaSe_2$ в политип 3R- $TaSe_{1,98}Te_{0,02}$. Для него при $0,1 \leq x \leq 0,35$ характерно сосуществование волн зарядовой плотности (ВЗП) и сверхпроводимости при температурах выше 0,4 К. Политип 3R- $TaSe_{1,65}Te_{0,35}$ имеет самую высокую критическую температуру T_c сверхпроводящего перехода, равную 2,4 К (в 17 раз выше, чем у 2H- $TaSe_2$). При $0,8 \leq x \leq 1,3$ возникает политип 1T с $T_c = 0,5–7$ К. При $1,8 \leq x \leq 2$ структура $TaSe_{2-x}Te_x$ снова испытывает полиморфное изменение и проявляет свойства нормального металла до 0,4 К. Поликристаллические образцы синтезировались в две стадии в ходе твердотельной реакции и затем монтировались на острие оптоволонка. Исследование структуры проводилось методами рентгенографии (дифрактометр Bruker Apex II), сканирующей электронной микроскопии (микроскоп JEOL 2100F) и сканирующей туннельной микроскопии (СТМ собственного изготовления). Вакуумные СТМ-измерения проводились на сколах образцов. Выполнялись также измерения намагниченности образцов в зависимости от температуры (в широком интервале от 0 до 300 К) и приложенного поля, теплоемкости и удельного сопротивления. Обработка данных производилась с использованием нескольких стандартных программных пакетов. Причина превращения 2H → 3R пока остается неясной. Авторы предполагают, что она связана с тонкими различиями электронных характеристик отдельных слоев, поэтому предполагается дальнейшее изучение свойств политипических модификаций $TaSe_{2-x}Te_x$.

Г. В. Дедков

Нарушение трансляционной и вращательной симметрии в недодопированном $YBa_2Cu_3O_{6+y}$ при «полосовом» зарядовом упорядочении

Broken translational and rotational symmetry via charge stripe order in underdoped $YBa_2Cu_3O_{6+y}$. R. Comin, R. Sutarto, E. H. da Silva Neto, L. Chauviere, R. Liang, W. N. Hardy, D. A. Bonn, F. He, G. A. Sawatzky, A. Damascelli. Science. 2015. Vol. 347. No 6228. P. 1335–1339.

После того, как было открыт «полосовой» характер упорядочения локальных волн плотности в одном направлении в сверхпроводниках на основе лантана и оксидов меди, нестабильности зарядового упорядочения наблюдались во всех семействах купратов. Однако было затруднительно различить однонаправленный («полосовой») и двунаправленный («шахматный») зарядовый порядок в материалах на основе иттрия и висмута. Используя метод резонансного рентгеновского рассеяния, в работе измерен двумерный структурный фактор $YBa_2Cu_3O_{6+y}$. Полученные результаты свидетельствуют о наличии «полосового» зарядового упорядочения, ответственного за микроскопическую природу зарядовой модуляции купратов. Сверхпроводники типа $YBa_2Cu_3O_{6+y}$ (YBCO) представляют слоистые материалы на основе оксида меди, в которых допирование дырками обеспечивается стехиометрией кислорода в однонаправленных цепочках CuO , направленных вдоль оси **b**. Последние эксперименты выявили также наличие зарядового упорядочения в плоскостях Cu_2O с утроенной величиной соответствующего вектора периодичности. Однако до сих пор локальная симметрия волн зарядовой плотности в YBCO не поддавалась наблюдению. В связи с этим вопрос о фундаментальном харак-

тере полос заряда в дырочно-допированных купратах оставался открытым. В работе использован метод резонансного рентгеновского рассеяния (RXS) для изучения локальной корреляции плотности заряда в состоянии с зарядовым упорядочением и связи этого состояния со сверхпроводимостью в недодопированном YBCO. Техника RXS представляет уникальное сочетание дифракции для диагностики обратной решетки и резонансной спектроскопии поглощения, позволяющей определить химический состав атомов в узлах решетки. В результате RXS непосредственно измеряется структурный фактор $S(Q_x, Q_y)$, где Q_x и Q_y – векторы обратной решетки вдоль осей H и K , соответственно. Структурный фактор связан с корреляционной функцией «плотность-плотность» и с параметром порядка волны зарядовой плотности (ВЗП) в обратном пространстве. Представление зарядового упорядочения в реальном пространстве допускает два возможных сценария: 1) с биаксиальной анизотропией, когда имеются домены, вытянутые в x - и y -направлении и 2) с одноосной анизотропией, когда домены преимущественно направлены в одну сторону. Результирующая форма пиков ВЗП однозначно свидетельствует об отсутствии «шахматного» зарядового упорядочения и согласуется с линейно-«полосовым» характером модуляций распределения заряда. Изучалась также температурная зависимость продольных и поперечных корреляционных длин параллельных и перпендикулярных соответствующим векторам упорядочения. Сделан вывод о том, что конкуренция между зарядовым упорядочением и сверхпроводимостью является более сильной для корреляций заряда поперек полос, что является дополнительным свидетельством одноосного характера зарядового упорядочения.

Г. В. Дедков

Непрерывная печать 3D-объектов в жидком разделе фаз

Continuous liquid interface production of 3D objects. John R. Tumbleston, David Shirvanyants, Nikita Ermoshkin, Rima Januszewicz, Ashley R. Johnson, David Kelly, Kai Chen, Robert P. Pincus, Jason P. Rolland, Alexander Ermoshkin, Edward T. Samulski, Joseph M. DeSimone. Science. 2015. Vol. 347. No 6228. P. 1349–1352.

3D-печать обычно использует пошаговый способ изготовления объектов, требующий большого времени. Нынешние методы 3D-печати, например послойное наплавление, селективное лазерное спекание, стереолитография, чрезмерно медленны, поскольку основаны на послойном методе построения. Предметы, имеющие размер в несколько сантиметров, могут изготавливаться в течение нескольких часов. Чтобы 3D-печать стала удобной для массового производства, скорость печати должна возрасти по крайней мере на порядок при сохранении хорошей точности изготовления. В работе показано непрерывное изготовление трехмерных монолитных полимерных деталей размером десятки сантиметров с разрешением менее 100 мкм. Замедление окисления свободных радикалов при полимеризации – широко известная проблема смол, отверждаемых ультрафиолетовым облучением. При фотополимеризации на воздухе оно приводит к незавершенному отверждению и клейкости поверхности. Но управляемое замедление окисления можно использовать для упрощения и ускорения стереолитографии. Непрерывное создание жидкой границы фаз достигается с помощью кислородопроницаемого окна под плоскостью проекции ультрафиолетового образа, что создает «мертвую зону» между окном и полимеризованной частью

поверхности, то есть – постоянную жидкую границу раздела фаз, особый тонкий жидкий слой, где полимеризация протекает медленно. Над мертвой зоной в объеме смолы непрерывно образуется твердая фаза, которая вызывает силу абсорбции, постоянно вовлекающую в реакцию жидкую смолу. Такой непрерывный процесс принципиально отличается от тех, что используются в традиционных стереолитографических принтерах, где ультрафиолетовая засветка, подача смолы и передвижение детали производятся по отдельности и дискретными шагами. Даже при инверсном способе, когда фотополимеризация производится при взаимодействии смолы с воздухом, эти шаги должны происходить последовательно при создании каждого слоя. Поскольку каждый шаг занимает несколько секунд для одного слоя, а толщина каждого слоя равна 50-100 мкм, то вертикальная скорость печати ограничена несколькими миллиметрами в час, что обусловлено скоростью отверждения смолы и ее вязкостью, а не пошаговым формированием слоев. Сложные твердые тела можно создать из смолы со скоростью сотен миллиметров в час, обеспечив толщину мертвой зоны порядка десятков микрометров. Толщина мертвой зоны обеспечивается разумным выбором оптических свойств смолы, ее способности к отверждению и величиной светового потока. Такой способ печати позволяет производить детали за минуты вместо часов. Размер получаемых объектов может варьироваться от 50 мкм до 25 см и более. Предварительные исследования показывают, что непрерывная 3D-печать в жидком разделе фаз применима к изготовлению деталей из мягких эластичных материалов, керамики и биологических материалов. Этот способ можно применить во многих областях науки и техники, и понизить стоимость изготовления сложных предметов из полимеров.

И. Ю. Лещанский

Еженедельный журнал Российской ассоциации содействия науке

НАУКА В мире

www.naukavmire.ru