

ежемесячный научно-информационный журнал

SCIENTIFIC  
AMERICAN

# В мире науки

№11 2006

## МОЗГ ЭКСПЕРТА: механизмы мастерства



Двигатель  
для **КОСМОПЛАНА**

**Сила псевдогенов**

Странные  
спутники

Каймот  
двигает  
горы

Леса  
пытются  
ЛОСОСЕМ

[www.sciam.ru](http://www.sciam.ru)





# содержание

НОЯБРЬ 2006

## ГЛАВНЫЕ ТЕМЫ НОМЕРА:

- 14** **ФИЗИКА И ОПТИКА**  
**В ПОИСКАХ СУПЕРЛИНЗЫ**  
Джон Пэндри и Дэвид Смит  
*Созданная из метаматериалов с удивительными оптическими свойствами, суперлинза может давать изображения с деталями меньше длины волны используемого света*
- 22** **АСТРОНОМИЯ**  
**САМЫЕ СТРАННЫЕ СПУТНИКИ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ**  
Дэвид Джевит, Ян Клейна и Скотт Шеппард  
*Необычные спутники, обнаруженные на петлеобразных орбитах, позволяют понять, как формировались планеты*
- 30** **КОСМОЛОГИЯ**  
**ОСТРОВА В ОКЕАНЕ ТЕМНОЙ ЭНЕРГИИ**  
Игорь Караченцев и Артур Чернин  
*Вселенная — мир галактик и вакуума. Недавние исследования показали, что галактики и все космические тела погружены в неведомую ранее среду, получившую название «темная энергия». На эту среду приходится приблизительно 75% всей энергии и массы Вселенной*
- 38** **ЧЕЛОВЕК И КОСМОС**  
**ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ КОСМОПЛАНА**  
Томас Джексон  
*Создание принципиально нового двигателя, благодаря которому полеты в космос станут дешевле и доступнее, — сложная, но выполнимая задача*
- 46** **БИОЛОГИЯ**  
**ПОДЛИННАЯ ЖИЗНЬ ПСЕВДОГЕНОВ**  
Марк Герштейн и Дэю Чжен  
*Поврежденным генам, разбросанным по всему человеческому геному, есть что рассказать, но пока их истории остаются неуслышанными*
- 54** **ПСИХОЛОГИЯ**  
**КАК ВОСПИТАТЬ ГЕНИЯ?**  
Филип Росс  
*Исследование процессов мышления у шахматных гроссмейстеров помогло понять, каким образом люди становятся компетентными специалистами и в других областях*
- 62** **АРХЕОЛОГИЯ**  
**ИСПОВЕДЬ МУМИИ**  
По материалам беседы с Алексеем Кролом  
*Археологические находки в Фаюмском оазисе опровергают некоторые устоявшиеся представления о поздних этапах развития цивилизации Древнего Египта*
- 70** **НАУКИ О ЗЕМЛЕ**  
**КЛИМАТ И ЭВОЛЮЦИЯ ГОР**  
Кип Ходжес  
*Новые исследования Гималаев и Тибета раскрывают взаимосвязь климата и тектоники*

**Учредитель и издатель:** ЗАО «В мире науки»

**Главный редактор:** С.П. Капица  
**Заместитель главного редактора:** В.Э. Катаева

**Зав. отделами:**  
**фундаментальных исследований** А.Ю. Мостинская  
**естественных наук** В.Д. Ардаматская

**Арт-директор:** Л.П. Рочева

**Ответственный секретарь:** О.И. Стрельцова

**Редакторы:** Ю.Г. Юшквичюте,  
А.А. Приходько

**Выпускающий редактор:** М.А. Янушкевич

**Спецкорреспондент:** Д.В. Костикова

**Над номером работали:**  
 А.В. Банкрашков, Е.Г. Богадист, В.П. Варламов,  
 И.М. Грачева, Е.Н. Демьгина, О.В. Закутняя,  
 И.Д. Караченцев, Б.А. Квасов, М.Б. Молчанов,  
 Т.В. Потапова, И.Е. Сацевич, В.И. Сидорова, Е.В. Славина,  
 В.Г. Сурдин, Н.Г. Усанов, В.В. Федорова, П.П. Худолей,  
 И.В. Человеков, А.Д. Чернин, Б.В. Чернышев,  
 Н.Н. Шафрановская

**Научные консультанты:**  
 профессор, д.т.н. Л.А. Иванова; профессор, д.з.н.  
 М.В. Конотопов; к.и.н. А.А. Крол; член-корреспондент РАН,  
 д.г.-м.н. Д.Ю. Пушаровский; профессор, д.т.н. В.А. Скибин;  
 профессор, д.х.н. В.К. Шведас

**Верстка:** А.Р. Гукасян

**Корректра:** Я.Т. Лебедева

**Секретарь:** О.С. Быковская

**Генеральный директор**  
**ЗАО «В мире науки»:** С.А. Бадиков

**Главный бухгалтер:** Т.М. Братчикова

**Помощник бухгалтера:** С.М. Амелина

**Отдел распространения:** Л.В. Старшинова

**Подписка:** О.А. Флакова

**Старший менеджер**  
**по связям с общественностью:** А.А. Рогова

**Адрес редакции:**  
 105005, Москва, ул. Радио, д. 22, к. 409  
**Телефон:** (495) 727-35-30, тел./факс (495) 105-03-72  
**e-mail:** edit@sciam.ru; www.sciam.ru

**Размещение рекламы:** Рекламное агентство ООО «Видео  
 Интернешнл-пресс ВИ», 121522, Москва, ул. Оршанская,  
 д. 3, тел. (495) 956-33-00, факс 737-64-87

 Иллюстрации предоставлены *Scientific American, Inc.*  
 В верстке использованы шрифты *Helios* и *BookmanC*

 Отпечатано в Эстонии, типография **Printall**
**© В МИРЕ НАУКИ**

 Журнал зарегистрирован в Комитете РФ по печати.  
 Свидетельство ПИ №ФС77-19285 от 30.12.2004

**Тираж:** 10 000 экземпляров  
 Цена договорная.

 Перепечатка текстов и иллюстраций только с письменного согласия  
 редакции. При цитировании ссылка на «В мире науки» обязательна.  
 Редакция не всегда разделяет точку зрения авторов и не несет  
 ответственности за содержание рекламных материалов. Рукописи не  
 рецензируются и не возвращаются.

**SCIENTIFIC AMERICAN**

ESTABLISHED 1845

**Editor in Chief:** John Rennie

**Editors:** Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins,  
 Steve Mirsky, George Musser, Christine Soares

**News Editor:** Philip M. Yam

**Contributing editors:** Mark Fichetti,  
 Marguerite Holloway, Philip E. Ross,  
 Michael Shermer, Sarah Simpson, Carol Ezzell Webb

**Art director:** Edward Bell

**Vice President and publisher:** Bruce Brandfon

**Chairman emeritus:** John J. Hanley

**Chairman:** John Sargent

**President and chief executive**  
**officer:** Gretchen G. Teichgraber

**Vice President and managing director,**  
**international:** Dean Sanderson

**Vice President:** Frances Newburg

© 2004 by Scientific American, Inc.

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

## РАЗДЕЛЫ:

- 3** **ОТ РЕДАКЦИИ**  
**СОХРАНИТ ЛИ ИНТЕРНЕТ**  
**НЕЙТРАЛИТЕТ?**
- 4** **50, 100, 150 ЛЕТ ТОМУ НАЗАД**
- 6** **СОБЫТИЯ, ФАКТЫ, КОММЕНТАРИИ**

- Ферма «Макдоналдс»
- Затмение Вселенной
- Космические горизонты
- Солнечный ветер рождает бури
- Цифровая ретушь
- Рак передается половым путем
- Прогноз стихии по-американски и по-русски
- Хлопковое поле боя
- Нобелевские лауреаты — 2006
- Планеты вне Солнечной системы: ясный взор

## ОБЗОРЫ:

**90** **КНИЖНОЕ ОБОЗРЕНИЕ**
**92** **СПРОСИТЕ ЭКСПЕРТОВ**
*Почему большинство почв — коричневые?  
 Почему радуга имеет форму окружности?*


# СОХРАНИТ ЛИ ИНТЕРНЕТ нейтралитет?

Сегодня девизом Мировой сети вполне можно считать подпись под известной карикатурой Питера Стейнера (Peter Steiner): «В Интернете никто не знает, что ты собака». Дело не только в том, что цифровая связь позволяет сохранить анонимность, но и в том, что базовые TCP/IP-протоколы, управляющие потоками данных, в высшей степени эгалитарны. Сетевые маршрутизаторы совершенно одинаково обрабатывают любые информационные пакеты, кому бы они ни принадлежали. Благодаря действительно равным возможностям смекалистые предприниматели, открывающие новый бизнес у себя в гаражах, успешно конкурируют с самыми богатыми компаниями.

Однако с ростом популярности потокового видео и других сервисов, проходящих под общим названием «Web 2.0», телекоммуникационные компании все чаще выступают против сетевой нейтральности. AT&T, Verizon, Comcast и другие владельцы магистральных линий Интернета предлагают ввести ранжирование потоков данных для обеспечения более рациональной передачи информации. Если они добьются своего, то новым девизом Сети станет цитата из «Скотного двора» Джорджа Оруэлла (George Orwell): «Все животные равны, но некоторые равнее».

Телекоммуникационные компании хотели бы ввести многоярусные тарифы и взимать плату с поставщиков веб-контента не только

за использованный трафик, но и за гарантию приоритетного обслуживания их информационных потоков. Полученная прибыль могла бы покрыть расходы на развитие инфраструктуры, необходимое в свете увеличения спроса на пропускную способность каналов связи. Разумеется, дополнительной платы можно было бы требовать не с поставщиков веб-контента, а с конечных пользователей, но такой вариант крайне нежелателен.

Вот тут-то и кроется подвох. Фирмы, подписавшие соглашения с телекоммуникационными компаниями, равно как и дочерние предприятия последних, получают колоссальное преимущество перед своими соперниками. О конкуренции и о новых перспективных интернет-компаниях можно будет забыть. Некоторые веб-сайты вообще станут практически недоступными. А дополнительные расходы со временем все равно лягут на плечи потребителей веб-контента, который, несомненно, дорожает.

Поборники нейтральности Сети предлагают более разумный выход. Когда-нибудь система ранжирования информационных потоков действительно станет необходимой, но приоритет контента должен определяться его востребованностью, а не сделками телекоммуникационных компаний и капризами владельцев кабелей. Более того, личные блоги и многие другие веб-страницы постепенно превращаются в сборную



Кто заплатит за онлайн-видео?

солянку из текстов, картинок и видеоклипов из разных источников. С переходом на многоярусные тарифы эта тенденция будет доведена до абсурда. Честнее и практичнее было бы не распределять стоимость онлайн-видео на всех пользователей Сети, а дать возможность каждому потребителю оплачивать ту информацию, которая ему наиболее интересна.

Реквием по нейтральности виртуального пространства был бы не таким печальным, если бы не повсеместный монополизм телекоммуникационных компаний. Желаящим получить широкополосный доступ к Интернету волей-неволей приходится иметь дело с одним из двух-трех местных провайдеров. Согласитесь, отсутствие конкуренции — плохой стимул для улучшения качества услуг. Будучи заложниками телекома, сможем ли мы сохранить свободу и равенство возможностей хотя бы в виртуальном мире? ■

### Экспериментальная агрессия ■ Бразильский авиатор ■ Владычество железа

#### НОЯБРЬ 1956

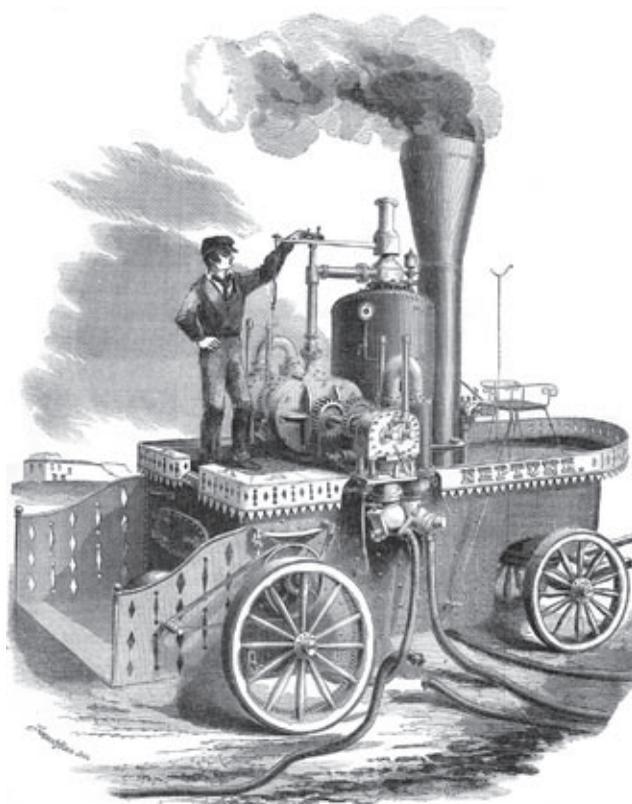
**ИГРЫ ДЛЯ НАУКИ.** «Согласно нашей рабочей гипотезе, две соревнующиеся группы рано или поздно становятся враждебными друг другу, даже если состоят из уравновешенных индивидов. Чтобы спровоцировать конфликт между двумя командами мальчиков, мы организовали спортивный турнир по бейсболу, американскому футболу, перетягиванию каната, поискам сокровищ и т.д. День за днем обстановка накалялась: ребята из разных команд начали обзывать друг друга, обвинять в мошенничестве, рисовать угрожающие плакаты, устраивать набеги и обстреливать соперников гнилыми яблоками», — Музафер Шериф (Muzafer Sherif).

#### НОЯБРЬ 1906

**ПОЛЕТ ДЮМОНТА.** 23 октября в предместьях Парижа самолет Альберто Сантоса Дюмонта преодолел по воздуху 46 м на высоте 6 м. Это первый полет моторизованного пилотируемого аэроплана, состоявшийся на глазах сотен очевидцев, в том числе представителей Французского аэроклуба. Чтобы машина с человеком на борту оторвалась от земли, молодому бразильцу пришлось установить на нее двигатель мощностью 50 лошадиных сил. Интересно отметить, что не так давно братья Райт заявили о достижении вдвое большей скорости на вдвое более тяжелом самолете с двигателем вдвое меньшей мощности.

**СТАЛЬНОЙ ВЕК.** Металлургия США столкнулась с затруднениями, нетипичными для современной промышленности: предприятия по производству конструкционной стали перегружены работой. В еще более сложном положении оказались сталепрокатные заводы. Ажиотажный спрос на их продукцию в значительной степени связан с ростом популярности автомобилей.

**МЯСО ДЛЯ БЕДНЫХ.** Недавно в Германии открылись так называемые фрайбанки, в которых официально продают стерилизованное несортовое мясо, теоретически пригодное для употребления в пищу. Например, говядина с личинками гельминтов попадает на прилавок после длительной заморозки, а туберкулезная свинина подвергается нагреванию до высокой температуры в закрытых сосудах. Цены во фрайбанках и количество мяса, отпускаемого в одни руки, устанавливаются местными властями. Подобных лавок пока нет во Франции, но в соответствии с законом спроса и предложения они пользуются популярностью у малоимущих покупателей.



Пожарная машина «Нептун» с паровым приводом, 1856 г.

#### НОЯБРЬ 1856

**ПАРОВОЕ ПОЖАРОТУШЕНИЕ.** На иллюстрации изображена ротационная паровая пожарная машина «Нептун», изготовленная компанией *Island Works* в штате Нью-Йорк. В паровом двигателе и нагнетательном насосе нового агрегата использованы эллиптические ротационные поршни. На Турнире пожарных, проведенном в начале сентября в Сенека-Фолс, машина выдавала две струи диаметром 4 см, бившие на 51 м.

**ДЕШЕВАЯ СТАЛЬ.** Генри Бессемер получил американский патент на усовершенствование производства железа. В основу заявки легло научное открытие: продувая воздух или водяной пар через жидкий чугун, можно без дополнительных затрат топлива сжигать избыток углерода. И хотя этот метод был изобретен задолго до Бессемера, именно он первым объяснил, зачем нужно пропускать обогащенные кислородом газы через расплавленную руду.



# ФЕРМА «Макдоналдс»

## Первый лекарственный препарат из молока трансгенных коз: ждать осталось недолго

На ферме компании *GTC Biotherapeutics* в Чарлтоне, шт. Массачусетс, содержатся 30 генетически модифицированных коз, дающих необычное молоко, в котором присутствует человеческий белок антитромбин, разжижающий кровь. Ранее созданный на его основе лекарственный препарат *ATrup* не получил в Европе разрешения на использование, однако сегодня соответствующие органы готовы пересмотреть свое решение. Окончательный ответ будет дан в начале 2007 г., и тогда, возможно, *ATrup* станет первым человеческим белком, производимым трансгенными животными и предназначенным для коммерческого использования.

Этот опыт проложит дорогу применению других трансгенных животных в аналогичных целях. На-

пример, специалисты фирмы *Origen Therapeutics* из Берлинггема, шт. Калифорния, разработали простой и недорогой метод создания генетически модифицированных кур (подобный тому, что применяется для получения трансгенных мышей, широко используемых в лабораторных опытах). В организме птиц могут вырабатываться самые разные белки, входящие в состав яиц, в том числе и служащие основой белковых лекарственных средств.

Обычно подобные препараты получали путем культивирования клеток млекопитающих в биореакторах. Однако для многих веществ, в том числе белков, в норме присутствующих в плазме крови, такой метод не подходит. К тому же подобным способом трудно наработать большое количество продукта, а это, в свою очередь, влияет на его цену. Так, стоимость 100 кг лекарственного вещества, получаемого культивированием клеток млекопитающих в ферментерах, достигает сотен миллионов долларов. В то же время стоимость такого же количества продукта, выработанного 150 генетически модифицированными козами компании *GTC* или

5 тыс. кур фирмы *Origen*, не превышает нескольких десятков миллионов долларов.

Работы по созданию трансгенных коз с нужными свойствами заняли у *GTC* 15 лет. В январе 2004 г., когда продукт был готов, фирма обратилась в Европейское агентство по проверке лекарственных препаратов (*EMEA*), которое проводило клинические испытания препаратов для лечения больных, страдающих дефицитом антитромбина. Таким больным грозят серьезные осложнения (сильное кровотечение) при проведении операций и во время родов. Это довольно редкое заболевание, встречающееся с частотой один случай на 3–5 тыс. человек, так что организовать испытания было не просто.

В феврале 2006 г. *EMEA* отказалось одобрить к применению *ATrup*, сочтя, что пяти случаев его использования при хирургических вмешательствах, давших положительный эффект, недостаточно для принятия положительного решения. *GTC* опротестовало такой вердикт, хотя шансы на успех были невелики. «Очень немногим компаниям удавалось в аналогичных ситуациях переломить ситуацию», — замечает Филип Надю (*Philip Nadeau*), биотехнолог-аналитик из фирмы *Cowen and Company*. Тем не менее, в июне комитет *EMEA*, учтя мнение ведущих гематологов Европы, решил включить в число доводов «за» девять случаев применения *ATrup* при родах, давших положительные результаты (ранее эти случаи были исключены из рассмотрения). Окончательное решение относительно применения *ATrup* в хирургии должно быть принято Европейской комиссией в декабре.

Рынок сбыта *ATrup* пока невелик: ожидаемый объем продаж в Европе и США составляет всего \$50 млн. Однако сфера применения *ATrup* может расширяться. Его можно



Трансгенные козы компании *GTC Biotherapeutics*: полная готовность

использовать при ожогах, операциях по коронарному шунтированию, при сепсисе и трансплантации спинного мозга. В таком случае объем продаж может составить \$700 млн. по всему миру.

Многие исследователи полагают, что трансгенные животные вскоре станут реальной альтернативой на рынке производства лекарственных средств. Пройдет немного времени, и в продаже появятся новые трансгенные препараты.

Чарлз Чой

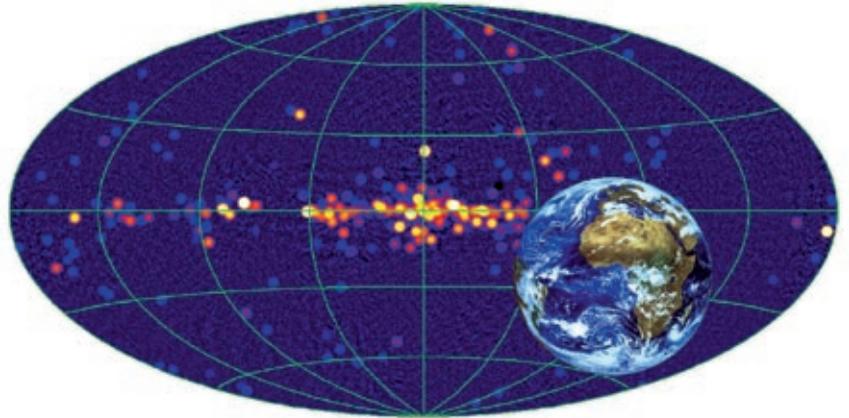
Исследователи из компании *Origen Therapeutics* в Берлингейме (шт. Калифорния) и из Калифорнийского университета в Дэвисе разработали метод получения трансгенных кур. Он основан на встраивании нужных генов в зародышевые клетки с использованием электрического тока, который открывает поры в клеточной мембране. Модифицированные клетки инъецировали обычным курам и получали трансгенное потомство. Ранее для введения генов в куриный эмбрион для получения целевых продуктов пытались использовать ретровирусы.

Новый метод позволяет вводить в клетки нуклеотидные последовательности, в 20 раз более протяженные, чем это можно было сделать с помощью вирусных векторов. Появляется возможность получать более сложные белковые продукты и в большем количестве.

## ЗАТМЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Астрофизики стали на шаг ближе к определению точного количества черных дыр во Вселенной. Международная группа ученых под руководством российских астрофизиков Евгения Чуразова и Рашида Сюняева (Институт космических исследований РАН, Институт астрофизики им. Макса Планка, Германия) провела измерения космического рентгеновского фонового излучения с помощью орбитальной обсерватории «Интеграл». Необычность наблюдений заключалась в том, что приборы обсерватории смотрели не в космос, а на Землю.

Космическое рентгеновское фоновое излучение появляется в результате активности миллионов черных дыр, находящихся в центрах галактик (речь идет о так называемых активных ядрах галактик, (АЯГ или AGN — *active galactic nucleus*). Они слишком далеки, чтобы их можно было различить. Если измерить спектр фонового рентгеновского и гамма-излучения, а также спектр отдельного АЯГ, то теоретически можно рассчитать количество черных дыр во Вселенной. Но измерение излучения рентгеновского фона достаточно сложно: он одинаков во всех направлениях на небе и не создает никакой специальной тени на детекторе обсерваторий, рабо-



Эта карта неба получена с помощью гамма-обсерватории Европейского космического агентства (ESA) «Интеграл» на основании данных, собранных за четыре года, и представляет собой серьезный шаг вперед в подсчетах количества черных дыр во Вселенной

тающих по принципу кодированной маски (к их числу относится и «Интеграл»). Для того чтобы почувствовать сигнал фона Вселенной, необходимо закрыть часть поля зрения прибора. Использовать Землю в качестве своеобразного «щита», который перекроет часть фонового излучения Вселенной, и предложили российские астрофизики.

В результате обработки полученной информации был восстановлен спектр фонового излучения в диапазоне от 5 до 100 кэВ с пиком на энергии в 29 кэВ. Задача дальнейших исследований — построить модель распределения АЯГ во Вселенной

по количеству, массе и расстоянию от Земли. Кроме этого, необходимы дальнейшие наблюдения рентгеновского фонового излучения Вселенной в более широком диапазоне энергий, которые позволят уточнить форму спектра космического излучения. Так, например, по словам Евгения Чуразова, эксперимент можно повторить во второй половине 2007 г., но уже в более благоприятных условиях. В это время луч наблюдений будет направлен не на галактический диск, а в отдаленную от него точку, что позволит расширить энергетический диапазон наблюдений.

Ольга Закутняя

# КОСМИЧЕСКИЕ ГОРИЗОНТЫ

## В России стартовал проект «Телескопы Фолкеса»

Оказывается, увидеть далекие галактики и туманности можно с помощью обыкновенного ноутбука на уроке астрономии в школе. Причем не просто увидеть, но и почувствовать себя настоящим исследователем бесконечных космических просторов — управлять настоящим телескопом, выбирать нужную точку небесной сферы, задавать параметры наблюдений. Такую возможность предоставляет британский проект «Телескопы Фолкеса» (*Faulkes Telescope*), к которому в сентябре присоединились ученики 24 российских школ из Москвы, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Екатеринбурга, Самары и других городов. Инициатор проекта в России — Британский Совет, российские партнеры — Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга МГУ и региональные департаменты образования.

Пять лет назад миллиардер Дилл Фолкес выделил деньги на строительство исследовательских телескопов при условии, что на них бок о бок с профессиональными астрономами смогут работать и школьники. Свое решение вложить несколько



десятков миллионов долларов в этот проект он объяснил желанием возродить интерес к звездному небу, которым характеризовались 60-е годы прошлого века. Были построены два телескопа высотой 8 м, с диаметром основного зеркала 2 м — один на Гавайских островах, второй в Северной Австралии.

Телескопы-роботы дистанционно управляются из центра, расположенного в Великобритании. Все, что требуется для работы с ними, — доступ в Интернет. Каждый пользователь посылает в центр запрос с координатами объекта или точки

небесной сферы, который передается на телескоп. Через несколько секунд на компьютер поступают прекрасные фотографии звезд, галактик и других объектов Вселенной.

Например, с помощью телескопа на Гавайях 4 июля 2005 г. британские школьники могли в режиме реального времени наблюдать настоящую драму — бомбардировку кометы Темпл-1 космическим аппаратом *NASA Deep Impact*. Теперь воспользоваться подобной услугой могут и российские учащиеся.

«Вашу страну мы выбрали не случайно, — сообщил корреспонденту



журнала «В мире науки» руководитель проекта, директор программ постдипломного педагогического образования доктор Патрик Фуллик. — Россия славится высоким уровнем школьного преподавания математики, физики и астрономии. И лишать заинтересованную молодежь возможности вести увлекательные наблюдения за космическими объектами недопустимо. Мирская наука нам этого не простит»

На сайте *Hands-On-Universe, Russia* школы, участвующие в проекте, и астрономы смогут поделиться результатами своих исследований не

только друг с другом, но и с коллегами в Великобритании и Европе.

Научный руководитель проекта в России, директор Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга академик Анатолий Черепашук считает, что телескопы Фолкеса — отличный исследовательский инструмент среднего класса, позволяющий наблюдать за быстротекущими процессами во Вселенной, сверхновыми, активными галактиками, планетами и другими объектами за пределами Солнечной системы. В рамках проекта планируется

строительство всемирной сети, состоящей из 40 телескопов, и некоторые из них могут быть размещены на огромной территории России, разделенной на 10 часовых поясов, что позволит вести непрерывные наблюдения и изучать космические объекты в динамике.

Проект «Телескопы Фолкеса» уже оправдал себя: в январе этого года журнал *Nature* сообщил об обнаружении самой маленькой из открытых за пределами Солнечной системы планеты, масса которой в 5,5 раз превышает массу Земли.

Елена Славина

## СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР РОЖДАЕТ БУРИ

Механизм зарождения геомагнитных бурь в результате увеличения плотности солнечного ветра был экспериментально доказан российскими учеными из Института космических исследований РАН на основе анализа данных космических аппаратов, работавших в рамках проекта «Интербол».

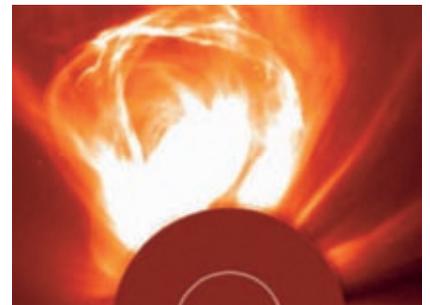
Солнечный ветер — это поток сверхзвуковой плазмы, выбрасываемой короной Солнца, основной переносчик воздействия нашего светила на все планеты, в том числе и на земную магнитосферу. Основных факторов солнечно-земного взаимодействия два: вариации параметров межпланетного магнитного поля, которое несет солнечный ветер, и изменения плотности плазмы самого солнечного ветра.

Ведущий научный сотрудник ИКИ РАН Георгий Застенкер отмечает: «Ранее наибольшее внимание уделялось первому из этих факторов и считалось, что именно вариации межпланетного магнитного поля вызывают более или менее сильные геомагнитные возмущения. Но известны случаи, когда межпланетное магнитное поле оставалось постоянным, а возмущение геомагнитного поля, тем не менее, происходило,

и было связано только со скачком плотности плазмы, то есть с ее давлением на магнитосферу».

Измерения, позволившие более детально исследовать эту взаимосвязь, были проведены с помощью спутников международного проекта «Интербол» (1995–2000 гг.). Были обнаружены интересные особенности солнечного ветра. Так, например, резкое изменение концентрации плазменных ионов фактически одновременно фиксируют приборы на спутниках, разнесенных в пространстве на большие расстояния. При этом скорость плазмы и магнитное поле Солнца во время этих скачков плотности почти не меняются.

Возник вопрос, где рождаются такие скачки: в самой солнечной короне или по дороге от Солнца к Земле вследствие плазменных неустойчивостей? По мнению Застенкера, более вероятна вторая версия. В ее пользу говорят и заметные расхождения в данных спутниковых наблюдений одного и того же события в разных местах. На графике видны скачки плотности плазмы по данным трех аппаратов, разнесенных в пространстве вдоль и поперек (поперек — приблизительно на 200 тыс. км): «Интербола-1» (100 тыс. км от Земли),



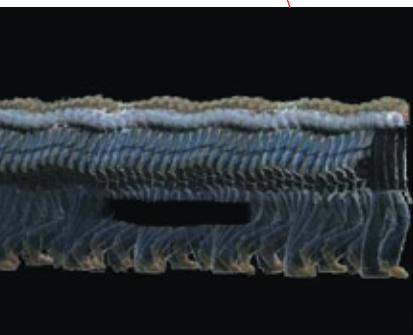
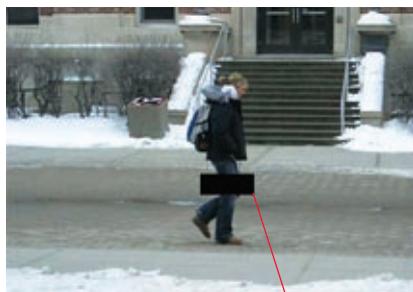
японского спутника *Geotail* (60 тыс. км) и американского аппарата *Wind* (больше 1 млн. км). По данным «Интербола-1» и *Geotail* получается более крутая стенка, концентрация плотности меняется резче, чем на достаточно пологом графике данных *Wind*. Вероятно, это свидетельствует об «укручении» фронта этого события на том отрезке в миллион километров, что разделяет аппараты. Иными словами, быстрая плазма догоняет более ранний поток, и фронт ее начинает «укрущаться». Но какой процесс вызывает это явление, мы пока не знаем, так как плазма движется как единое целое и ее параметры меняются одновременно на достаточно большом расстоянии как вдоль, так и поперек. Это задачи будущих исследований.

Валерия Федорова

# цифровая РЕТУШЬ

## Разработан алгоритм автоматического восстановления подвижных изображений

В одном из эпизодов трилогии «Властелин колец», снятой американским режиссером Питером Джексоном, внимательные зрители могли заметить движущийся автомобиль и след его выхлопных газов. С незначительными дефектами легко справляется инструмент под названием «исцеляющая кисть» (*healing brush*) из арсенала программы *Adobe After Effects*, а вот крупные огрехи приходится кропотливо «замазывать», накладывая подходящие фрагменты изображения поверх по-



Наложение изображений помогает выявить кадры, которые можно использовать для восстановления всего эпизода. На одном из кадров (сверху) поврежденная область изображена в виде черного прямоугольника

стороннего объекта. Результат, как правило, оставляет желать лучшего: в DVD-версии «Братства кольца» на месте злосчастного автомобиля отчетливо видно мутное пятно.

Гильермо Сапиро (Guillermo Sapiro) из Миннесотского университета считает, что в ближайшем будущем видеоинженеры смогут быстро и качественно исправлять операторские ошибки. Сейчас он разрабатывает программу, которая будет автоматически удалять из кадра даже большие движущиеся объекты.

В 1998 г. Сапиро и трое его коллег занялись изучением традиционной французской техники реставрации. Парижские реставраторы начинают восстановление с краев поврежденной области, прорисовывают структуру фрагмента к ее центру, а затем наносят краску, руководствуясь общей яркостью картины. Начав с черно-белых изображений, исследователи перевели художественную технику на язык дифференциальных уравнений, описывающих изменение яркости фотографии в разных направлениях.

Если нужно восстановить поврежденную область в форме круга, программа, словно художник, заполняет ее от краев к центру, постепенно дорисовывая изофоты — линии, на которых яркость изображения остается постоянной. Восстановление заканчивается, когда оттенки серого, наносимые вдоль этих кривых, достигают центра «заплатки». При обработке цветных изображений отдельно рассчитывается яркость красного, зеленого и синего цветов. NASA использовало программу Сапиро и его коллег для реконструкции фотографий Венеры ([www. iua.upf.es/~mbertalmio/venus/index.html](http://www. iua.upf.es/~mbertalmio/venus/index.html)).

Чтобы применять новый алгоритм для восстановления видео, недостаточно просто обрабатывать кадр за кадром. Например, футболку

с логотипом, который заслонен посторонним объектом, компьютер восстановит без труда, но самого логотипа в кадре уже не будет. Однако программа, учитывающая изменение видеоизображения во времени, сможет отреставрировать логотип, накладывая друг на друга соседние кадры.

В доработанной версии алгоритма время рассматривается как третья измерение. Плавно перемещающаяся круговую область поврежденного изображения можно представить как прогрызающего стопку кадров червячка, длина которого равна продолжительности присутствия дефекта. Когда пространственно-временные границы последнего определены, программа прорисовывает трехмерную область, одновременно восстанавливая двухмерные круги в каждом кадре, чтобы получающееся изображение было плавным. К счастью, пользователю достаточно указать на дефект лишь в одном кадре, после чего компьютер сам определяет размеры «червячка», отделяя подвижные части изображения от неподвижных.

Алгоритм Сапиро пока не появился в коммерческих программных продуктах: исследователи еще дорабатывают его. В сотрудничестве с Кедаром Патварданом (Kedar A. Patwardhan) из Миннесотского университета и Маркело Бертальмио (Marcelo Bertalmio) из Университета Помпеи Фабра в Барселоне, Сапиро опубликовал работу, в которой описал более быстрый алгоритм, учитывающий типичные движения видеокамеры. Однако по-прежнему нет программ, корректирующих резкие движения объектива и удаляющих увеличивающиеся или уменьшающиеся посторонние объекты. Впрочем, когда-нибудь программисты научатся справляться и с такими задачами.

Бри Файнголд

# рак ПЕРЕДАЕТСЯ ПОЛОВЫМ ПУТЕМ

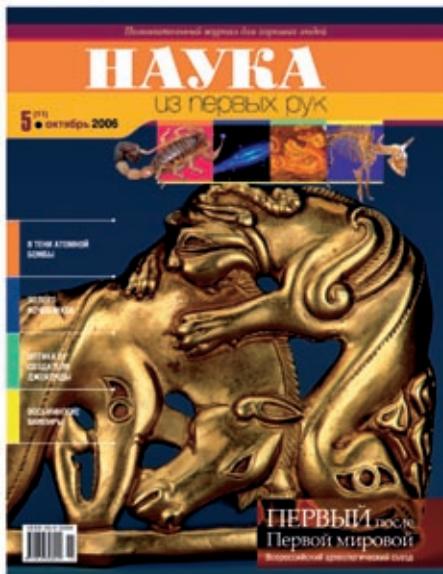
Собаки могут болеть раком, передающимся половым путем и распространяющимся посредством опухолевых клеток. Эти клетки, подобно паразитам, «путешествуют» по всему земному шару, переходя от одного хозяина к другому. Робин Вейс (Robin Weiss) и его коллеги из Лондонского университетского колледжа исследовали опухоли, обнаруженные у собак и родственных им животных — волков и койотов. ДНК-анализ образцов тканей, взятых от больных собак с пяти разных континентов, показал, что опухолевые клетки не принадлежат тем животным, у которых они обнаружены. Все они генетически почти идентичны друг другу и сходны с клетками волков или родственных животных из Китая или Сибири. Оценка числа мутаций, накопившихся в ДНК этих клеток, указывает на то, что они появились от 200 до 2500 лет назад и являются, таким образом, самой старой из известных линий раковых клеток. Исследование клеток опухолей этого типа поможет выяснить, в чем причина их «живучести» и как им удается ускользать от недремлющего ока иммунной системы.

Чарлз Чой



Клетки опухолей собак, страдающих раком, передающимся половым путем, — самая древняя из всех известных сегодня линий раковых клеток млекопитающих

Научно-популярный журнал  
«НАУКА из первых рук»  
(SCIENCE First Hand — версия журнала на англ. языке)  
Выходит 6 раз в год



Адрес редакции: 630090, г. Новосибирск,  
пр. Ак. Коптюга, 4; тел. +7(383) 333-26-98, 335-63-61  
www.ScienceFirstHand.ru, www.SibScienceNews.org

Читайте в журнале «НАУКА из первых рук» № 5, 2006 г.:

#### Первый после Первой мировой

После почти столетнего перерыва возобновляет работу Всероссийский археологический съезд. О 300-летней истории отечественной археологии — по малозвестным документальным свидетельствам, сохраненным в архивах и музеях

#### В ПОИСКАХ СОКРОВИЩА БОГАТЫРЯ ХАРА-ЦЗЯНЬ-ЦЗЮНЬ

Среди неизданных трудов выдающегося археолога С.И. Руденко — рукопись о Мертвом городе Тангутского царства, скрытом в безводных песках Гоби

#### ЗОЛОТО КОЧЕВНИКОВ

О происхождении уникальных предметов из золотой Сибирской коллекции Петра I — первого российского собрания древностей

#### А.А. КОВАЛЬСКИЙ. НА БРАННОМ ПОЛЕ ЦЕПНЫХ РЕАКЦИЙ

Первый Атомный проект: пятьдесят лет под грифом «секретно»

#### ВОСЬМИНОГИЕ ВАМПИРЫ

За одну «кровоавую» трапезу самка таежного клеща — переносчика почти трех десятков инфекций — может увеличить свой вес в 100 раз!

#### НА ПРИЦЕЛЕ У ЭНЦЕФАЛИТА

Новосибирские ученые разрабатывают вакцины против энцефалита с использованием гено-инженерной ДНК

#### НОВЫЙ ОБЛИК ОПТИКИ

В основе искусственного хрусталика глаза и зеркала будущих космических телескопов лежит красивое физическое явление, открытое Леонардо да Винчи

#### СТРАНСТВИЯ ПОД СОЗВЕЗДИЯМИ СКОРПИОНА

Лишь три процента от полутора тысяч известных видов скорпионов смертельно ядовиты для человека

## ПРОГНОЗ СТИХИИ ПО-АМЕРИКАНСКИ И ПО-РУССКИ



Сотни организаций по всему миру будут следить за тысячами геофизических параметров атмосферы, океана и земной поверхности благодаря новому международному проекту постоянного глобального наблюдения Земли (GEOSS).

«На текущий момент уже около 60 стран согласились участвовать в проекте GEOSS. Планируется создать самую полную компьютерную базу данных, которая сформирует

образ планеты со всеми течениями, ветрами, изменяющимися рельефами и т. д.», — заявил глава американской Национальной администрации по океану и атмосфере (NOAA), вице-адмирал Конрад Лаутенбахер.

С учетом собранных данных можно будет делать своевременные прогнозы землетрясений, цунами, ураганов и штормов, выработать рекомендации по адаптации

и устойчивому развитию климатически зависимых отраслей экономики — энергетики, сельского хозяйства, транспорта, жилищного сектора и др. Система окажет неоценимую помощь рыболовецким судам в получении оперативной информации о перемещении косяков рыбы. Учреждения здравоохранения, службы спасения и многие другие общественные организации, опираясь на полученные данные, смогут принимать упреждающие меры по предотвращению вспышек опасных заболеваний в конкретных регионах.

Конрад Лаутенбахер отметил, что существует соглашение с Росгидрометом, согласно которому России оказывается помощь в дистанционных наблюдениях, построении моделей систем предупреждения на основе информации, поступающей с американских спутников в режиме реального времени. Он считает, что только такое сотрудничество позволит получить полную картину глобальных изменений в мире. Новая база будет действовать подобно Интернету, связывая пользователей из разных стран для свободного обмена информацией.

Елена Славина

## ХЛОПКОВОЕ ПОЛЕ БОЯ

Генетически модифицированный хлопок, способный вырабатывать пестицид, который кодируется одним из генов бактерии *Bacillus thuringiensis* (Bt), не оправдал надежд. Об этом свидетельствуют результаты опроса 481 китайского фермера из пяти провинций — основных производителей этой культуры. В течение нескольких лет фермеры, выращивающие

Bt-хлопок, получали на 30% больше прибыли, чем те, кто не был сторонником инноваций, поскольку расходовали на 70% меньше пестицидов. Но затем появились Bt-резистентные насекомые, и фермерам пришлось обрабатывать свой генетически модифицированный хлопок точно так же, как и обычный. Это «съело» всю прибыль, поскольку Bt-семена втрое

дороже простых. Специалисты, обнародовавшие эти данные на заседании Американской агроэкономической ассоциации 25 июля прошлого года, рекомендовали использовать для борьбы с вредителями их естественных врагов или модифицировать хлопок и дальше, чтобы он мог противостоять им.

Чарлз Чой

# нобелевские лауреаты — 2006



Итог 105-й нобелевской недели оказался одновременно и неожиданным, и закономерным. Впервые за последнее десятилетие все премии в области естественных наук присуждены за сугубо фундаментальные исследования, имеющие отношение к самым основам существования живой и неживой материи, проведенные сравнительно недавно, в последние 10–15 лет назад.

Лауреатами нобелевской премии по физиологии и медицине стали американские ученые Эндрю Файр (Andrew Z. Fire) и Крэйг Меллоу (Craig C. Mello) за открытие механизма РНК-интерференции (подавления экспрессии генов двухцепочечной РНК).

Премия по химии присуждена американцу Роджеру Корнбергу (Roger D. Kornberg) за исследования молекулярных основ транскрипции у эукариот.

Нобелевскими лауреатами по физике названы также Джон Мэзер (John C. Mather) из NASA и Джордж Смут (George F. Smoot) из Университета Беркли за открытие анизотропии и чернотельной структуры энергетического спектра микроволнового фонового излучения.

Премию Банка Швеции за достижения в экономической науке памяти Альфреда Нобеля получил профессор Колумбийского университета, Эдмунд Фелпс (Edmund S. Phelps) за исследования в области инфляции и безработицы.

Лауреатом Нобелевской премии по литературе стал турецкий писатель Орхан Памук (Orhan Pamuk). Как сообщает Нобелевский комитет, премия присуждена человеку, который «в поиске меланхолической души своего родного города выявил новые символы столкновения и смены культур».

Нобелевская премия мира в этом году присуждена Мухаммеду Юнусу (Muhammad Yunus) и основанному им банку *Grameen Bank* за систему микрокредитов для беднейших слоев населения Бангладеш и Юго-Восточной Азии. Награда поделена на две равные части: банку — «за усилия по способствованию экономическому и социальному развитию снизу», а самому Юнусу — за «самоотверженность и лидерство на этом пути». Мухаммед Юнус писал о своем банке в *Scientific American* в 1999 г. Автором журнала был и обладатель премии по химии Роджер Корнберг.

Елена Славина

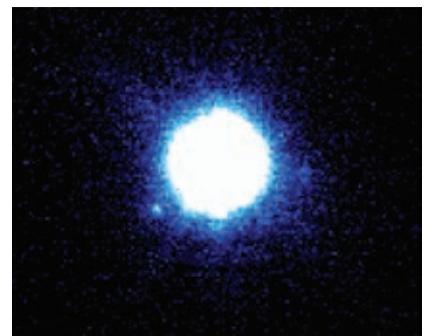
## ЯСНЫЙ ВЗОР

«У людей, как и у планет, есть тайная и явная жизнь», — писала Мэри Анн Эванс, известная под псевдонимом Джордж Элиот. О большинстве планет, находящихся за пределами Солнечной системы, мы можем судить лишь по их взаимодействию с видимыми объектами. Однако до сих пор не получено ни одного их достоверного изображения.

Майкл Лью (Michael Liu) из Гавайского университета и его коллеги начинают один из самых амбициозных в истории науки проектов, цель которого — запечатлеть «лики планет-невидимок». Исследователи планируют

использовать новый коронограф, экранирующий звезду в исследуемой системе, и высокочувствительный самонастраивающийся оптический прибор, компенсирующий мерцание.

Используя технологию спектрального вычитания для подавления остатков звездного блеска, ученые сосредоточатся на излучении метана, не содержащегося в горячих звездах типа Солнца. В ходе исследований планируется провести непосредственные наблюдения планет-гигантов, обращающихся вокруг молодых звезд, и изучить состав их

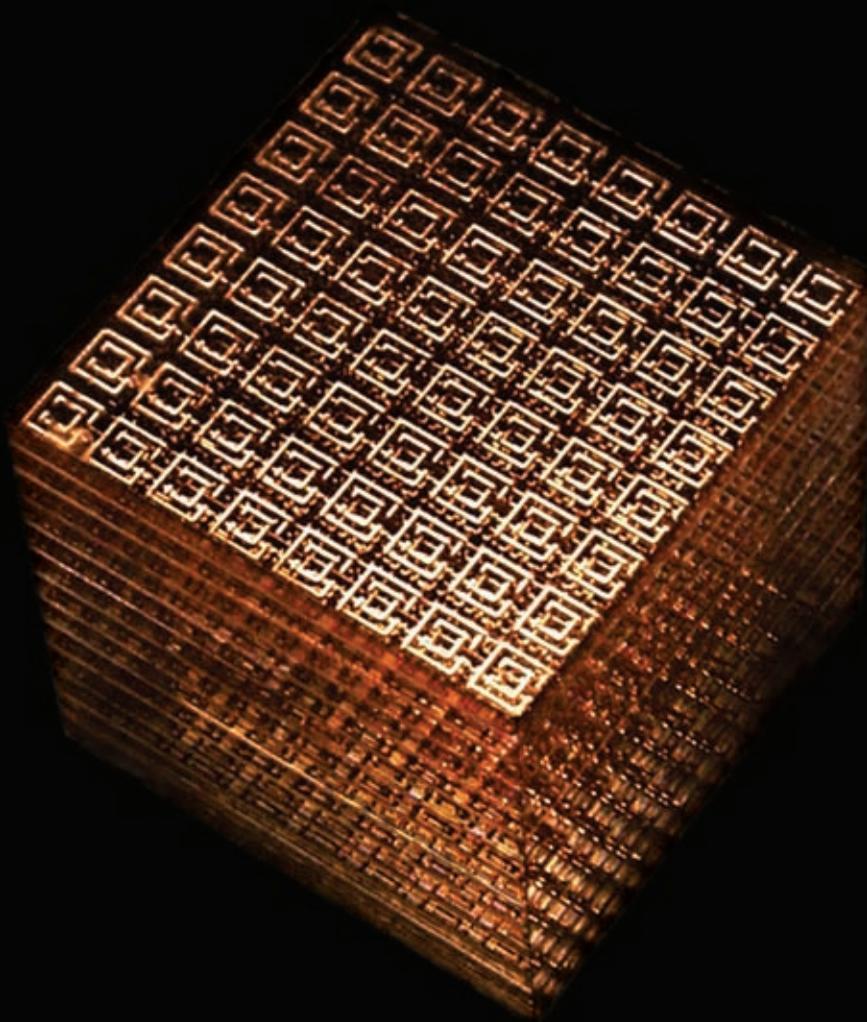


атмосферы. Возможно, астрономам удастся обнаружить и признаки инопланетной жизни.

Джордж Массер

Джон Пэндри и Дэвид Смит

# В ПОИСКАХ суперлинзы



Куб метаматериала представляет собой трехмерную матрицу, образованную медными проводниками и кольцами с разрезом. Микроволны с частотами около 10 ГГц ведут себя в таком кубе необычно, потому что для них он имеет отрицательный показатель преломления. Шаг решетки — 2,68 мм или около 0,1 дюйма

Сконструированная из метаматериала с удивительными оптическими свойствами, суперлинза дает изображения с деталями меньше длины волны используемого света

Почти 40 лет назад советский ученый Виктор Веселаго выдвинул гипотезу о существовании материалов с отрицательным показателем преломления (*УФН*, 1967, т. 92, с. 517). Световые волны в них должны двигаться против направления луча и вообще вести себя удивительным образом, а линзы из этих материалов — обладать волшебными свойствами и характеристиками. Однако у всех известных веществ показатель преломления положителен: за несколько лет интенсивных поисков Веселаго не нашел ни одного материала с подходящими электромагнитными свойствами, и его гипотеза была забыта. О ней вспомнили лишь в начале XXI в. (см.: *Теория и практика Виктора Веселаго // ВМН*, № 12, 2006).

Электромагнитные свойства веществ определяются особенностями образующих их атомов и молекул, обладающих довольно узким диапазоном характеристик. Поэтому свойства миллионов известных нам материалов не так уж разнообразны. Однако в середине 1990-х гг. ученые из Центра технологии материалов им. Маркони в Англии занялись созданием метаматериалов, состоящих из макроскопических элементов и рассеивающих электромагнитные волны совсем не так, как любые известные вещества.

В 2000 г. Дэвид Смит вместе с коллегами из Калифорнийского университета в Сан-Диего (*UCSD*) изготовил метаматериал с отрицательным показателем преломления. Поведение света в нем оказалось настолько странным, что теоретикам пришлось переписать книги по электромагнитным свойствам веществ. Экспериментаторы уже занимаются разработкой технологий, в которых используются удивительные свойства метаматериалов, и создают суперлинзы, позволяющие получать изображения с деталями меньше длины волны используемого света. С их помощью можно было бы делать микросхемы с наноскопическими элементами и записывать на оптические диски огромные объемы информации.

**Отрицательное преломление**

Чтобы понять, как возникает отрицательное преломление, рассмотрим механизм взаимодействия электромагнитного излучения с веществом. Проходящая через него электромагнитная волна (например, луч света) заставляет двигаться электроны атомов или молекул. На это расходуется часть энергии волны, что влияет на ее свойства и характер распространения. Для получения требуемых электромагнитных характеристик исследователи подбирают химический состав материала.

Но как показывает пример метаматериалов, химия — не единственный путь получения интересных свойств вещества. Электромагнитный отклик материала можно «конструировать», создавая крошечные макроскопические структуры. Дело в том, что обычно длина электромагнитной волны на несколько порядков больше размеров атомов или молекул. Волна «видит» не отдельную молекулу или атом, а коллективную реакцию миллионов частиц. Это справедливо и для метаматериалов, элементы которых тоже значительно меньше длины волны.

Поле электромагнитных волн, что следует из их названия, имеет как электрическую, так и магнитную составляющую. Электроны в материале движутся вперед и назад под действием электрического поля и по кругу под действием магнитного. Степень взаимодействия определяется двумя характеристиками вещества: диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и магнитной проницаемостью  $\mu$ . Первая показывает степень реакции электронов на электрическое поле, вторая — степень реакции на магнитное. У подавляющего большинства материалов  $\epsilon$  и  $\mu$  больше нуля.

Оптические свойства вещества характеризуются показателем преломления  $n$ , который связан с  $\epsilon$  и  $\mu$  простым соотношением:  $n = \pm \sqrt{\epsilon \cdot \mu}$ . Для всех известных материалов перед квадратным корнем должен стоять знак «+», и поэтому их показатель преломления положителен. ▶

Однако в 1968 г. Веселаго показал, что у вещества с отрицательными  $\epsilon$  и  $\mu$  показатель преломления  $n$  должен быть меньше нуля. Отрицательные  $\epsilon$  или  $\mu$  получаются в том случае, когда электроны в материале движутся в направлении, противоположном по отношению к силам, создаваемым электрическим и магнитным полями. Хотя такое поведение кажется парадоксальным, заставить электроны двигаться против сил электрического и магнитного полей не так уж сложно.

Если толкнуть маятник рукой, он послушно переместится в направлении толчка и начнет колебаться с так называемой резонансной частотой. Подталкивая маятник в такт с качанием, можно увеличить амплитуду колебаний. Если же толкать его с более высокой частотой, то толчки перестанут совпадать с колебаниями по фазе, и в какой-то момент руку ударит маятник, движущийся ей навстречу. Точно так же электроны в материале с отрицательным показателем преломления входят в противофазу и начинают сопротивляться «толчкам» электромагнитного поля.

## Метаматериалы

Ключ к такого рода отрицательной реакции — резонанс, то есть стремление колебаться с определенной частотой. Он создается в метаматериале искусственно с помощью крошечных резонансных контуров,

имитирующих отклик вещества на магнитное или электрическое поле. Например, в разорванном кольцевом резонаторе (РКР) магнитный поток, проходящий через металлическое кольцо, наводит в нем круговые токи, аналогичные токам, обуславливающим магнетизм некоторых материалов (рис. на стр. 18). А в решетке из прямых металлических стержней электрическое поле создает направленные вдоль них токи.

Свободные электроны в таких контурах колеблются с резонансной частотой, зависящей от формы и размеров проводника. Если приложено поле с частотой ниже резонансной, будет наблюдаться нормальная положительная реакция. Однако с увеличением частоты отклик становится отрицательным, так же как в случае с маятником, движущимся навстречу, если толкать его с частотой выше резонансной. Таким образом, проводники в некотором диапазоне частот могут реагировать на электрическое поле как среда с отрицательной  $\epsilon$ , а кольца с разрезами — имитировать материал с отрицательной  $\mu$ . Эти проводники и кольца с разрезами и есть элементарные блоки, необходимые для создания широкого ассортимента метаматериалов, в том числе таких, которые искал Веселаго.

Первое экспериментальное подтверждение возможности создания материала с отрицательным показателем преломления было получено

в 2000 г. в UCSD. Поскольку элементарные кирпичики метаматериала должны быть значительно меньше длины волны, исследователи работали с излучением сантиметрового диапазона и использовали элементы размером в несколько миллиметров.

Калифорнийские ученые сконструировали метаматериал, состоящий из чередующихся проводников и РКР, собранных в виде призмы. Проводники обеспечивали отрицательную  $\epsilon$ , а кольца с разрезами — отрицательную  $\mu$ . В результате должен был получиться отрицательный показатель преломления. Для сравнения была изготовлена призма точно такой же формы из тефлона, у которого  $n = 1,4$ . Исследователи направили пучок СВЧ-излучения на грань призмы и измерили интенсивность волн, выходящих из нее под разными углами. Как и ожидалось, пучок подвергся положительному преломлению на призме из тефлона и отрицательному на призме из метаматериала. Предположение Веселаго стало реальностью: материал с отрицательным показателем преломления был наконец получен. Или нет?

## Желаемое или действительное?

Эксперименты в UCSD вызвали волну интереса среди исследователей. Когда Веселаго высказал свою гипотезу, метаматериалов еще не было, и специалисты не стали тщательно исследовать феномен отрицательного преломления. Теперь они стали уделять ему гораздо больше внимания. Скептики спрашивали, не нарушают ли материалы с отрицательным показателем преломления фундаментальные законы физики. Если бы это оказалось так, то вся программа исследований была бы поставлена под сомнение.

Самые горячие споры вызвал вопрос о скорости волны в сложном материале. Свет распространяется в вакууме с максимальной скоростью  $c = 300$  тыс. км/с. Скорость света в материале меньше:  $v = c/n$ . Но что будет, если  $n$  отрицателен? ▶

## ОБЗОР: МЕТАМАТЕРИАЛЫ

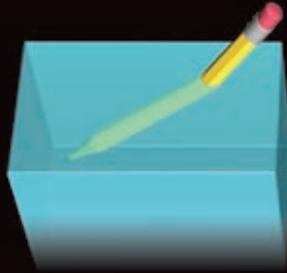
- Материалы, построенные из специальным образом сформированных микроскопических структур, могут иметь электромагнитные свойства, отличающиеся от свойств любых веществ естественного происхождения. В частности, эти метаматериалы могут иметь отрицательный показатель преломления, а это означает, что они преломляют свет совершенно иным образом.
- Слой материала с отрицательным преломлением действует как суперлинза, которая может превзойти существующие линзы с положительным преломлением. Такая суперлинза способна создавать изображения с деталями, более мелкими, чем допускает дифракционный предел разрешения, который ограничивает работу всех оптических элементов с положительным показателем преломления.
- Хотя большинство экспериментов с метаматериалами выполнено на частотах микроволн, в будущем эти материалы смогут работать и на более коротких, инфракрасных и оптических длинах волн.

## СТРАННОСТИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ПРЕЛОМЛЕНИЯ

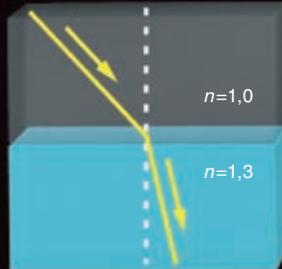
В среде с отрицательным показателем преломления свет (и все другие виды электромагнитного излучения) ведет себя не так, как в обычных материалах с положительным преломлением, причем во многих отношениях это поведение противоречит интуиции

### СРЕДА С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Карандаш в воде кажется изогнутым из-за более высокого показателя преломления воды



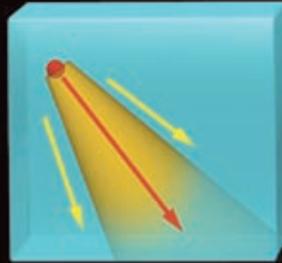
Когда свет переходит из среды с низким показателем преломления ( $n$ ) в среду с более высоким, он отклоняется в сторону нормали (пунктирная линия под прямым углом к поверхности раздела)



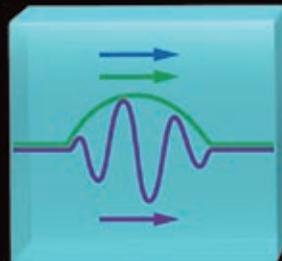
Удаляющийся объект кажется более красным из-за эффекта Доплера



Заряженный объект (красный), движущийся быстрее скорости света, создает конус Черенковского излучения (желтый), направленный вперед

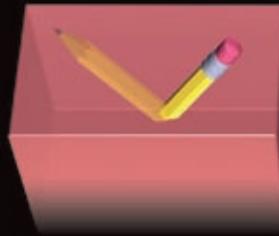


В среде с положительным показателем преломления отдельные максимумы электромагнитного импульса (фиолетовый) движутся в том же направлении, что и огибающая (зеленая) импульса и энергия (синяя)

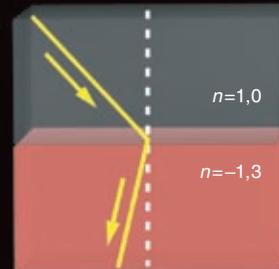


### СРЕДА С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Карандаш, погруженный в среду с отрицательным преломлением, будет казаться изогнутым наружу



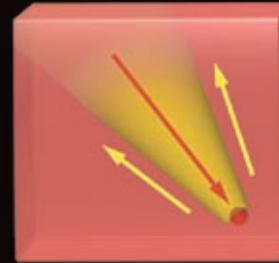
Когда свет идет из среды с положительным преломлением в среду с отрицательным, он отклоняется назад, оставаясь по ту же сторону нормали, что и падающий свет



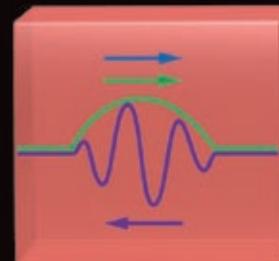
Удаляющийся объект кажется более синим



Конус обращен назад



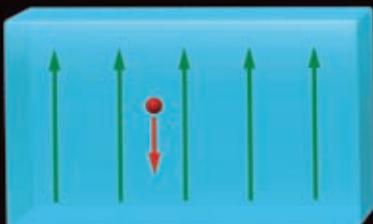
Отдельные всплески движутся в сторону, противоположную движению огибающей импульса и энергии



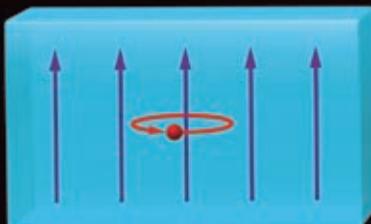
## КОНСТРУИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

Ключ к созданию метаматериала — разработка материала с нужной реакцией на электрические и магнитные поля

### В ОБЫЧНОМ МАТЕРИАЛЕ

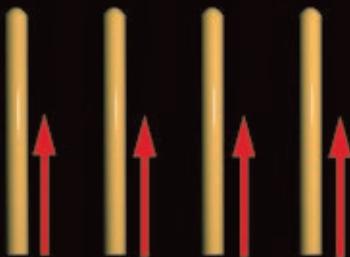


Электрическое поле (зеленое) вызывает линейное движение электронов (красные)



Магнитное поле (фиолетовое) вызывает круговое движение электронов

### В МЕТАМАТЕРИАЛЕ



В матрице проводников текут линейные токи (красные стрелки)

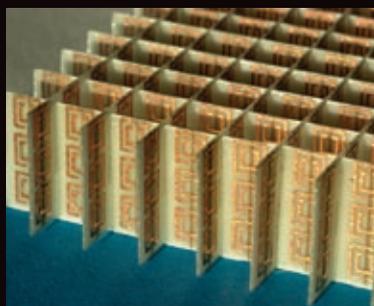


В кольцах с разрезами (резонаторах) текут круговые токи

### СТРУКТУРА МЕТАМАТЕРИАЛА



Метаматериал построен из матрицы проводников и колец с разрезом, размеры которых меньше, чем длина электромагнитных волн, для которых предполагается использовать материал



Веселого обнаружил, что в материале с отрицательным показателем преломления групповая и фазовая скорости имеют противоположные направления: отдельные максимумы и минимумы движутся назад, тогда как весь импульс перемещается вперед. Интересно рассмотреть, как будет себя вести непрерывный пучок света от источника (например, прожектора), погруженного в материал с отрицательным показателем преломления. Если бы можно было наблюдать отдельные колебания световой волны, то мы бы увидели, что они появляются на объекте, освещенном лучом, движутся назад и, в конечном счете, исчезают в прожекторе. Однако энергия светового пучка движется вперед, удаляясь от источника света. Именно в этом направлении фактически распространяется луч, несмотря на удивительное обратное движение его отдельных колебаний.

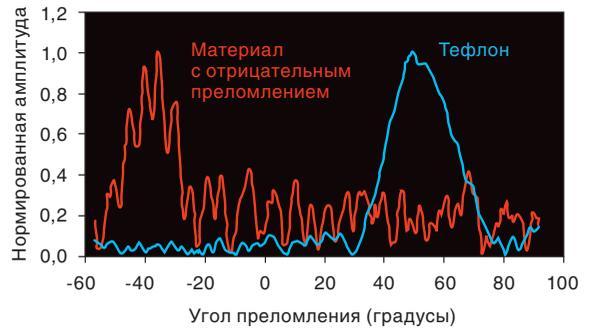
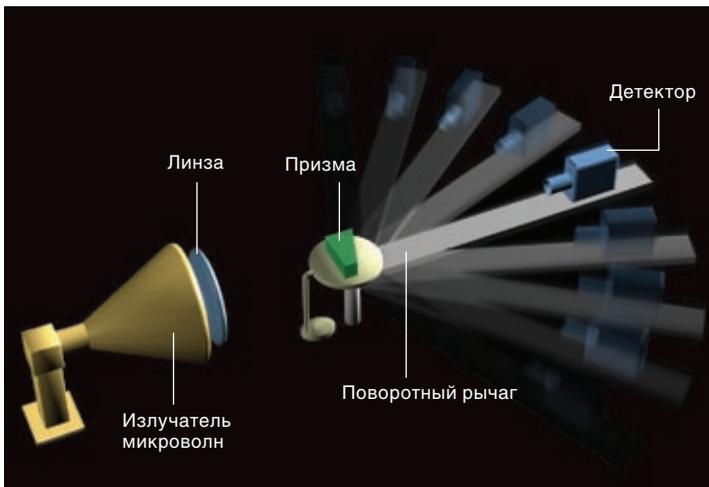
Практически наблюдать отдельные колебания световой волны трудно, а форма импульса может быть очень сложной, так что физики, чтобы показать различие между фазовой и групповой скоростями, часто используют хитрый трюк. Когда две волны с немного разными длинами движутся в одном направлении, они интерферируют, и возникает картина биений, максимумы которых перемещаются с групповой скоростью.

В 2002 г., применив этот прием к эксперименту UCSD по преломлению, Прашант Валанжа (Prashant M. Valanju) и его коллеги из Техасского университета в Остине наблюдали нечто любопытное. Преломляясь на границе сред с отрицательным и положительным показателем преломления, две волны с разными длинами отклонялись на немного разные углы. Картина биений получалась не такой, как следовало бы для лучей при отрицательном преломлении, а такой, какой она должна быть при положительном преломлении. Сопоставляя картину биений с групповой скоростью, исследователи из Техаса заключили, что любая физически осуществимая волна

Простая интерпретация формулы для скорости света показывает, что свет в таком случае распространяется в обратном направлении.

В более полном ответе учитывается, что волна имеет две скорости: фазовую и групповую. Чтобы понять их смысл, представьте себе импульс света, движущийся в среде. Он будет

выглядеть примерно так: амплитуда волны возрастает до максимума в центре импульса, а затем снова спадает (рис. на стр. 17). Фазовая скорость — это скорость отдельных всплесков, а групповая скорость — это скорость, с которой движется огибающая импульса. Они не обязательно должны быть одинаковыми.



В эксперименте, проведенном в Boeing Phantom Works в Сиэтле, использовались призмы из метаматериала и из тефлона (положительный показатель преломления), и было подтверждено явление отрицательного преломления. Тефлон преломлял микроволны под положительным углом (синяя линия), а метаматериал — под отрицательным (красная линия)

должна испытывать положительное преломление. И хотя материал с отрицательным показателем преломления мог бы существовать, отрицательное преломление получить невозможно.

Как же тогда объяснить результаты экспериментов в UCSD? Валанжа и многие другие исследователи приписывали наблюдаемое отрицательное преломление другим явлениям. Быть может, образец поглощал много энергии, что волны выходили наружу только с узкой стороны призмы, имитируя отрицательное преломление? В конце концов, метаматериал UCSD действительно сильно поглощает излучение, а измерения проводились вблизи призмы. Поэтому гипотеза о поглощении выглядела вполне правдоподобно.

Полученные выводы вызвали большое беспокойство: они могли обесценить не только эксперименты UCSD, но и весь круг явлений, предсказанных Веселаго. Однако после некоторых размышлений мы поняли, что полагаться на картину биений как на показатель групповой скорости нельзя: для двух волн, движущихся в разных направлениях, интерференционная картина никак не связана с групповой скоростью.

По мере того, как доводы критиков начали рушиться, появилось еще одно экспериментальное подтверждение отрицательного преломления. Группа Минаса Таниэлиана (Minas Tanielian) из компании Boeing Phantom Works в Сиэтле

повторила эксперимент UCSD с призмой из метаматериала, обладающей очень низким поглощением. Кроме того, датчик был расположен намного дальше от призмы, чтобы поглощение в метаматериале нельзя было перепутать с отрицательным преломлением луча. Высочайшее качество новых данных положило конец сомнениям в существовании отрицательного преломления.

### Продолжение следует

Когда дым сражения рассеялся, мы начали понимать, что замечательная история, которую рассказал Веселаго, была не последним словом о материалах с отрицательным показателем преломления. Советский ученый пользовался методом геометрического построения световых лучей с учетом отражения и преломления на границах различных материалов. Этот мощный прием помогает понять, например, почему объекты в бассейне кажутся нам ближе к поверхности, чем на самом деле, и почему наполовину погруженный в жидкость карандаш представляется изогнутым. Все дело в том, что коэффициент преломления воды ( $n = 1,3$ ) больше, чем у воздуха, и лучи света на границе между воздухом и водой преломляются. Показатель преломления приблизительно равен отношению реальной глубины к кажущейся.

Веселаго использовал построение хода лучей, чтобы предсказать,

что брус из материала с отрицательным показателем преломления  $n = -1$  должен действовать как линза с уникальными свойствами. Большинство из нас знакомо с линзами из материалов с положительным преломлением — в камерах, лупах, микроскопах и телескопах. Они имеют фокусное расстояние, и место, где формируется изображение, зависит от сочетания фокусного расстояния и расстояния между

### ОБ АВТОРАХ

**Джон Пэндри** (John B. Pendry) и **Дэвид Смит** (David R. Smith) — члены группы исследователей, получившей в 2005 г. премию им. Декарта за вклад в изучение метаматериалов. Они вместе участвовали в разработке таких материалов с 2000 г., причем Пэндри сосредоточился на теории, а Смит — на экспериментах. Пэндри — профессор физики в Имперском колледже в Лондоне, и в последнее время его главным интересом были электромагнитные явления, а также квантовое трение, перенос тепла между наноструктурами и квантование теплопроводности. Смит — профессор электротехники и вычислительной техники в Университете Дьюка. Он изучает распространение электромагнитных волн в необычных материалах и в настоящее время сотрудничает с несколькими компаниями, чтобы выявить и разработать новые применения метаматериалов и материалов с отрицательным преломлением.

объектом и линзой. Изображения обычно отличаются по размеру от объекта, и линза работает лучше всего для объектов, лежащих на оси, проходящей через нее. Линза Весе- лаго функционирует совершенно иначе, чем стандартные линзы (*врез внизу*): ее работа намного проще, она действует только на объекты, расположенные рядом с ней, и переносит все оптическое поле с одной своей стороны на другую.

Линза Весе- лаго столь необычна, что Джону Пэн- дри пришлось за- даться вопросом: насколько со- вершенно она может работать? И в частности, каково может быть предельное разрешение линзы Ве- селаго? Оптические элементы с по- ложительным показателем прелом- ления ограничены дифракционным пределом — они могут передавать детали, размер которых равен или больше длины волны света, отра- женного от объекта. Дифракция на- кладывает окончательный предел на все системы создания изображе- ния, наподобие наименьшего объ- екта, который можно рассмотреть в микроскоп, или наименьшего расстояния между двумя звезда- ми, которое может разрешить теле- скоп. Дифракция определяет также наименьшую деталь, которую мож- но создать в процессе оптической

литографии при производстве ми- кросхем. Подобным же образом дифракция ограничивает количе- ство информации, которую можно сохранить на оптическом цифровом видеодиске (*DVD*). Способ обойти дифракционный предел мог бы ре- шительным образом изменить тех- нологии, позволив оптической ли- тографии проникнуть в диапазон наноразмеров и, возможно, в сот- ни раз увеличить количество дан- ных, сохраняемых на оптических дисках.

Чтобы определить, действительно ли оптика с отрицательным прелом- лением могла бы превзойти обыч- ную («положительную») оптику, нам следует продвинуться дальше, а не просто рассматривать ход лучей. Препятствие пренебрегает ди- фракцией, и его нельзя использо- вать, чтобы предсказать разрешение линз с отрицательным преломле- нием. Чтобы включить в рассмотрение дифракцию, нам пришлось исполь- зовать более точное описание элек- тромагнитного поля.

## Суперлинза

При более точном описании элек- тромагнитные волны любых источ- ников — излучающих атомов, ра- диоантенн или пучка света — по- сле прохождения через маленькое

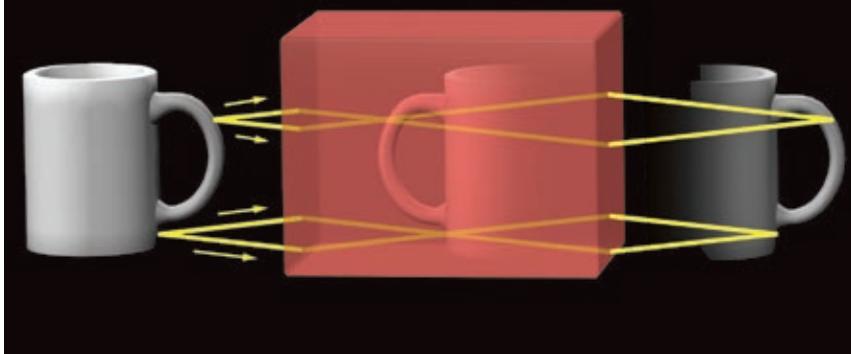
отверстие создают два разных типа полей: дальнее и ближнее. Дальнее поле наблюдается вдали от объекта и улавливается линзой, формиру- ющей изображение объекта. К со- жалению, в этом случае создается только грубая картина объекта, в которой дифракция ограничивает разрешение длиной волны. Ближнее поле содержит все мельчайшие дета- ли объекта, но его интенсивность быстро падает с расстоянием. Лин- зы с положительным преломлением не дают никакого шанса на перехват чрезвычайно слабого ближнего поля и передачу его данных в изображе- ние. Однако это не так для линз с от- рицательным преломлением.

Подробно исследовав, как ближ- ние и дальние поля источника вза- имодействуют с линзой Весе- лаго, Пэн- дри в 2000 г. ко всеобщему удив- лению пришел к заключению, что линза, в принципе, может фокуси- ровать как ближние, так и дальние поля. Если бы это ошеломляющее предсказание оказалось верным, это означало бы, что линза Весе- лаго, в отличие от всей другой известной оптики, не подчиняется дифракци- онному пределу. Поэтому плоскую структуру с отрицательным прелом- лением назвали суперлинзой.

При последующем анализе ока- залось, что разрешение суперлин- зы ограничено качеством материа- ла с отрицательным преломле- нием. Для лучшей работы требуется не только чтобы показатель прелом- ления  $n$  был равен  $-1$ , но также чтобы  $\epsilon$  и  $\mu$  оба были равны  $-1$ . Линза, у которой эти условия не выполняются, имеет резко ухудшенное разре- шение. Одновременное выполнение этих условий — очень серьезное тре- бование. Но в 2004 г. Энтони Грбич (*Anthony Grbic*) и Джордж Элефтери- адис (*George V. Eleftheriades*) из Уни- верситета Торонто эксперименталь- но показали, что метаматериал, по- строенный так, чтобы иметь  $\epsilon = -1$  и  $\mu = -1$  в диапазоне радиочастот, действительно может разрешать объекты в масштабе меньшем, чем дифракционный предел. Их резуль- тат доказал, что суперлинзу можно построить. Но можно ли ее создать

## СУПЕРЛИНЗА

Прямоугольный брусок из материала с отрицательным показателем преломления образует суперлинзу. Свет (*желтые линии*) от объекта (*слева*) преломляется на поверхности линзы и снова сходится, формируя перевернутое изображение внутри бруска. Выходя из него, свет преломляется снова и создает второе изображение (*справа*). Для некоторых метаматериалов изображение содержит детали, более мелкие, чем длина волны используемого света, что невозможно для линз с положительным преломлением





Тонкий слой серебра на очень малых расстояниях действует как суперлинза. Здесь изображение слова *NANO* получено с помощью сфокусированного пучка ионов (*слева*), оптическим путем без суперлинзы (*в центре*) и оптически, но со слоем серебра толщиной 35 нм (*справа*). Масштабный отрезок имеет длину 2 тыс. нм. Суперлинза дает лучшее разрешение, чем длина волны используемого света в 365 нм

для еще более коротких оптических волн?

Сложность масштабирования метаматериалов в область оптических длин волн имеет две стороны. Прежде всего, металлические проводящие элементы, образующие микросхемы метаматериала, наподобие проводников и колец с разрезом,

выполнить только условие  $\epsilon = -1$ , а значением  $\mu$  можно пренебречь. В прошлом году группа Ричарда Блэйки (Richard Blaikie) из Кентерберийского университета в Новой Зеландии и группа Ханга Занга (Xiang Zhang) из Калифорнийского университета в Беркли, следуя этим предписаниям, независимо проде-

заставила физиков пересмотреть практически всю область электромагнетизма. И когда этот круг идей будет полностью понят, основные оптические явления, такие как преломление и дифракционный предел разрешения, придется уточнить с учетом новых неожиданных поворотов, связанных с материалами, дающими отрицательное преломление.

Волшебство метаматериалов и магию отрицательного преломления все-таки необходимо «конвертировать» в прикладную технологию. Такой шаг потребует совершенствования конструкции метаматериалов и производства их по разумной цене. Сейчас в этой области действует множество исследовательских групп, энергично разрабатывающих способы решения проблемы. ■

## Возможность отрицательного преломления заставила физиков пересмотреть практически весь раздел электромагнетизма

нужно уменьшить до нанометров, чтобы они были меньше длины волны видимого света (400–700 нм). Во-вторых, короткие длины волн соответствуют более высоким частотам, а металлы на таких частотах обладают худшей проводимостью, подавляя таким образом резонансы, на которых основаны свойства метаматериалов. В 2005 г. Костас Соколис (Costas Soukoulis) из Университета штата Айова и Мартин Вегенер (Martin Wegener) из Университета Карлсруэ в Германии экспериментально продемонстрировали, что можно сделать кольца с разрезами, которые работают при длинах волн всего 1,5 мкм. Несмотря на то, что при столь малых длинах волн резонанс на магнитной компоненте поля становится весьма слабым, с такими элементами все еще можно сформировать интересные метаматериалы.

Но мы пока еще не можем изготовить материал, который при длинах волн видимого света приводит к  $\mu = -1$ . К счастью, возможен компромисс. Когда расстояние между объектом и изображением намного меньше, длины волны, необходимо

монстрировали сверхразрешение в оптической системе. При оптических длинах волн собственные резонансы металла могут приводить к отрицательной диэлектрической постоянной  $\epsilon$ . Поэтому очень тонкий слой металла при длине волны, где  $\epsilon = -1$ , может действовать как суперлинза. И Блэйки, и Занг использовали слой серебра толщиной около 40 нм, чтобы получить изображение пучков света с длиной волны 365 нм, испускаемых отверстиями, меньшими, чем длина волны света. И хотя серебряная пленка далека от идеальной линзы, серебряная суперлинза существенно улучшала разрешение изображения, доказав правильность основного принципа работы суперлинзы.

### Взгляд в будущее

Демонстрация работы суперлинзы — лишь последнее из многих предсказаний свойств материалов с отрицательным преломлением, которые предстоит реализовать, а это признак быстрого прогресса, происходящего в этой все расширяющейся области. Возможность отрицательного преломления

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Reversing Light with Negative Refraction. John B. Pendry and David R. Smith in *Physics Today*, Vol. 57, No. 6, pages 37–43; June 2004.
- Negative-Refractive Metamaterials: Fundamental Principles and Applications. G.V. Eleftheriades and K. Balmann. Wiley-IEEE Press, 2005.
- Дополнительная информация о метаматериалах и отрицательном преломлении имеется на:  
<http://www.ee.duke.edu/drsmith/>  
<http://www.cmth.ph.ic.ac.uk /photonics/references.html>  
<http://esperia.iesl.forth.gr/ppm/Research.html>  
<http://www.nanotechnology.bilkent.edu.tr/>  
<http://www.rz.uni-karlsruhe.de/ap/ag/wegener/meta/meta.html>



Испещренное кратерами ледяное тело Фебы, крупнейшего из нерегулярных спутников Сатурна, похоже на ядро кометы, захваченное с околосолнечной орбиты. Кратерам на поверхности Фебы даны имена героев-аргонатов: самый большой, наверху — Язон, слева от него — Эргин, а внизу, у границы с тенью — Оилей

Дэвид Джевит, Ян Клейна и Скотт Шеппард

# самые странные спутники в СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Необычные  
спутники,  
обнаруженные  
на петлеобразных  
орбитах, позволяют  
понять, как  
формировались  
планеты

**Н**икто и представить себе не мог, что число небесных тел в Солнечной системе так велико. За последние пять лет было открыто 86 «нерегулярных» спутников, чьи обратные орбиты сильно вытянуты и наклонены к экватору планеты. В основном они движутся вокруг своей планеты в направлении, обратном ее вращению.

Регулярные спутники (такие как спутник Земли или галилеевы спутники Юпитера), обращающиеся в прямом направлении, имеют меньшие и более округлые орбиты, лежащие почти в плоскости экватора. Например, Луна перемещается против часовой стрелки (если смотреть со стороны Северного полюса Земли), так же, как и Земля — вокруг своей оси и вокруг Солнца. Другие планеты тоже движутся против часовой стрелки, что, вероятно, обусловлено направлением вращения газопылевого диска, из которого они образовались 4,5 млрд. лет назад.

Прямое движение регулярных спутников астрономы объясняют их формированием в дисках вокруг своих планет. Противоположное же перемещение нерегулярных спутников не укладывается в стандартные модели. Похоже, что они возникли в давние времена, когда гравитационное влияние новорожденных планет срывало малые тела с исходных орбит. Изучение таких объектов позволит яснее представить ранние стадии формирования Солнечной системы.

## Белая ворона

Несмотря на то, что первый нерегулярный спутник (Тритон у Нептуна) был открыт в 1846 г., большинство из них было трудно обнаружить из-за небольших размеров и значительно более слабого блеска, чем у их регулярных собратьев. К тому же, они рассеяны по большому пространству. Так, самый дальний регулярный спутник Юпитера ►

обращается на расстоянии 1,9 млн. км от планеты, а известные нерегулярные движутся на расстоянии до 31 млн. км. Это сравнимо с размером зоны гравитационного влияния Юпитера, с так называемой сферой Хилла, за пределами которой Солнце способно «оторвать» спутник планеты. Если бы можно было увидеть сферу Хилла вокруг Юпитера, то ее поперечник был бы около 10°, что в 20 раз больше видимого углового диаметра полной Луны и значительно превышает возможности

им. Г. Герцберга провела аналогичные исследования в окрестностях Сатурна, Урана и Нептуна.

Оказалось, что все четыре планеты, независимо от массы, имеют схожие системы нерегулярных спутников различных размеров. Экстраполируя, мы подсчитали, что у каждой из планет должно быть около 100 нерегулярных спутников диаметром более 1 км. В системе Юпитера их размеры колеблются в пределах от 180 км у Гималии (*J6*) до 1–2 км у самых малых объектов.

## Нерегулярные спутники возникли в те времена, когда гравитационное влияние новорожденных планет срывало малые тела с исходных орбит

любого телескопа. Для просмотра таких обширных областей неба используются самые мощные цифровые приемники света, позволяющие анализировать до 100 гигабайт данных за ночь (*врез на стр. 28*).

Наша программа вначале была направлена на поиск спутников Юпитера. Группа астрономов под руководством Бретта Глэдмана (Brett Gladman) из Университета Британской Колумбии, включавшая также Мэттью Холмана (Matthew Holman) из Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра и Дж. Кавеларса (J.J. Kavelaars) из Национального исследовательского совета канадского Института астрофизики

Спутники движутся по петлеобразным орбитам, одним из самых сложных в Солнечной системе. Поскольку спутник значительно удален от своей планеты, на него почти в равной мере влияет притяжение как планеты, так и Солнца, отчего происходит быстрая прецессия орбиты, т.е. поворачивается большая ось ее эллипса.

### Космические ритмы

Когда на спутники одновременно оказывают влияние несколько сил, ситуация становится непредсказуемой. Например, если частота прецессии соответствует частоте обращения планеты вокруг Солнца,

спутник попадает в резонанс, называемый эвекцией. В этом случае последствия слабого влияния солнечной гравитации постепенно накапливаются и дестабилизируют орбиту: ее эллипс так вытягивается, что спутник либо сталкивается с планетой (или с одним из ее крупных спутников), либо вырывается из сферы Хилла в гравитационные объятия Солнца. При этом прямые орбиты более уязвимы, чем обратные. Если нерегулярные спутники изначально были как на прямых, так и на обратных орбитах, то резонанс приводит к тому, что в основном они сохраняются на обратных орбитах.

Другой эффект, известный как резонанс Козаи, связывает наклон и форму орбиты. Спутники, захваченные на наклонные орбиты, движутся по все более вытянутым траекториям, что тоже может привести к их выбросу с орбиты или разрушению. Возможно, поэтому наблюдатели не могут найти спутники с наклоном от 50° до 130°.

На орбитальное движение оказывает влияние не только гравитация, но и другие факторы. Например, в группах спутников Юпитера содержится до 17 осколков разбившегося при столкновении более крупного спутника, которые продолжают двигаться по сходной орбите. Если это так, то большинство нынешних нерегулярных спутников принадлежат ко второму поколению, а не к исходному.

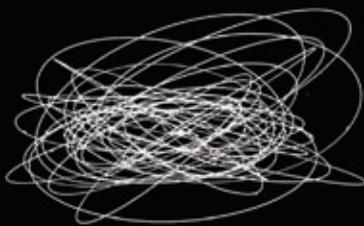
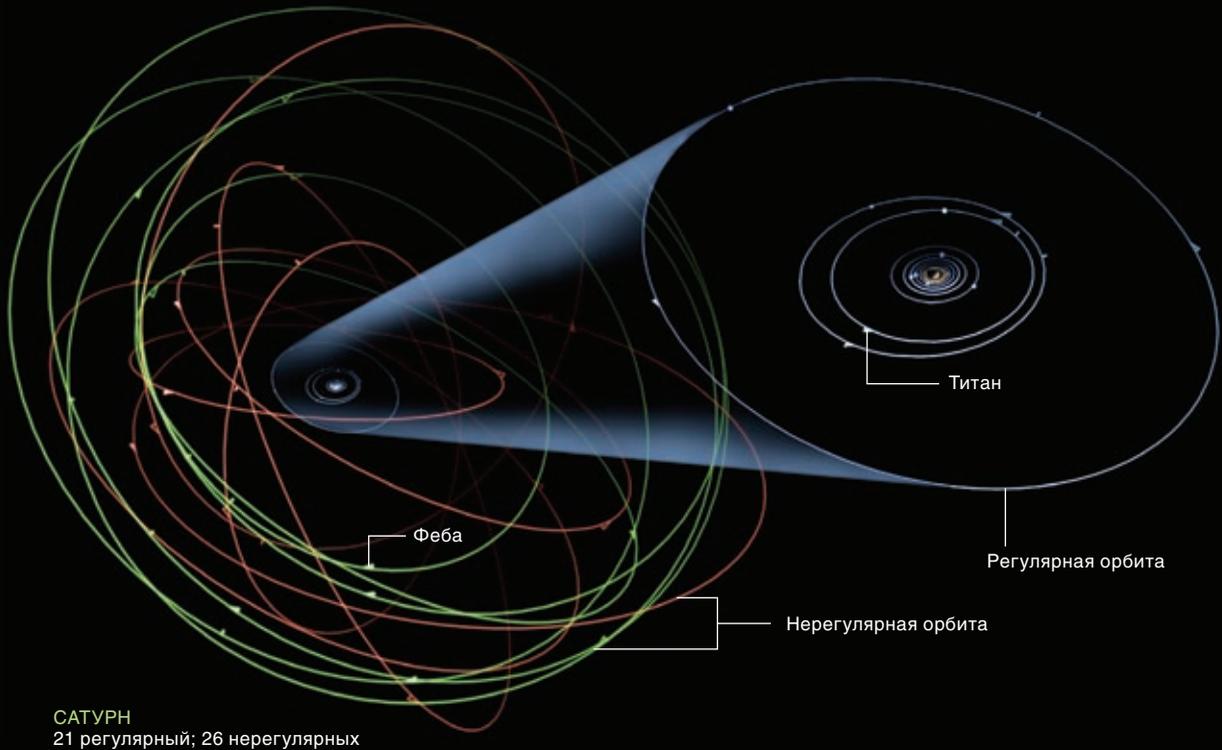
Кроме изучения орбит нерегулярных спутников астрономы исследуют и другие их характеристики. Яркость большинства из них так мала, что трудно узнать что-либо об их химическом составе. Но Томми Грэв (Tommy Grav) из Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра и Терри Реттиг (Terry Rettig) из Университета Нотр-Дам обнаружили, что спутники, входящие в одну группу, имеют схожий цвет, зависящий от их химического состава. Это подтверждает предположение, согласно которому члены одной группы — обломки более крупного разрушенного тела.

## ОБЗОР: НЕРЕГУЛЯРНЫЕ СПУТНИКИ

- Астрономы считают, что большинство планетных спутников сформировалось в дисках вокруг своих планет, повторив в миниатюре формирование Солнечной системы. Они движутся в плоскости экватора планеты в направлении ее вращения. Несколько тел с иной траекторией были названы «нерегулярными».
- Открытия, сделанные с помощью современных цифровых приемников света, показали, что в действительности большинство спутников — нерегулярные. Их широкие, петлеобразные, наклоненные орбиты свидетельствуют о том, что они сформировались на орбитах вокруг Солнца. В сущности, это астероиды или ядра комет, захваченные планетами.
- Спутники, которые возможно находились в поясе Койпера или несколько ближе могли быть захвачены в результате столкновений или других взаимодействий.

## СКОПЛЕНИЕ СПУТНИКОВ

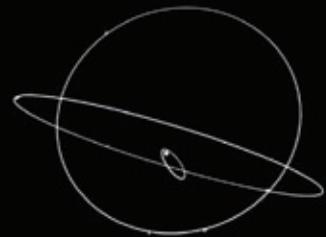
Спутники Сатурна делятся на два типа: регулярные (*голубые*), такие как Титан и Япет, имеют компактные, лежащие в одной плоскости орбиты; нерегулярные спутники, такие как Феба, имеют широкие, хаотически ориентированные орбиты. Одни из них обращаются в том же направлении, что и Сатурн (*красные*); другие — в противоположном (*зеленые*). Похожие системы спутников окружают и другие планеты-гиганты (*внизу*). На рисунках показаны не все спутники



**ЮПИТЕР**  
8 регулярных; 55 нерегулярных



**УРАН**  
18 регулярных; 9 нерегулярных



**НЕПТУН**  
6 регулярных; 7 нерегулярных

Один из немногих хорошо изученных нерегулярных спутников — Феба, спутник Сатурна, исследованный зондом «Кассини» в июне 2004 г. Тогда были получены четкие изображения многочисленных кратеров на поверхности Фебы, а также спектры отраженного солнечного света,

показавшие наличие льдов из воды и двуокси углерода. Два нерегулярных спутника Нептуна, Тритон и Нереида, исследованные зондом «Вояджер-2», также оказались покрыты льдами. Следовательно, все они, как и ядра комет, сформировались вдали от Солнца. В отличие от этих

объектов, нерегулярные спутники Юпитера, по-видимому, лишены льда, поскольку находятся вблизи Солнца, где температура слишком высока. Поэтому нерегулярные спутники Юпитера похожи на ядра комет, потерявшие свои летучие вещества. ▶

## Какое торможение?

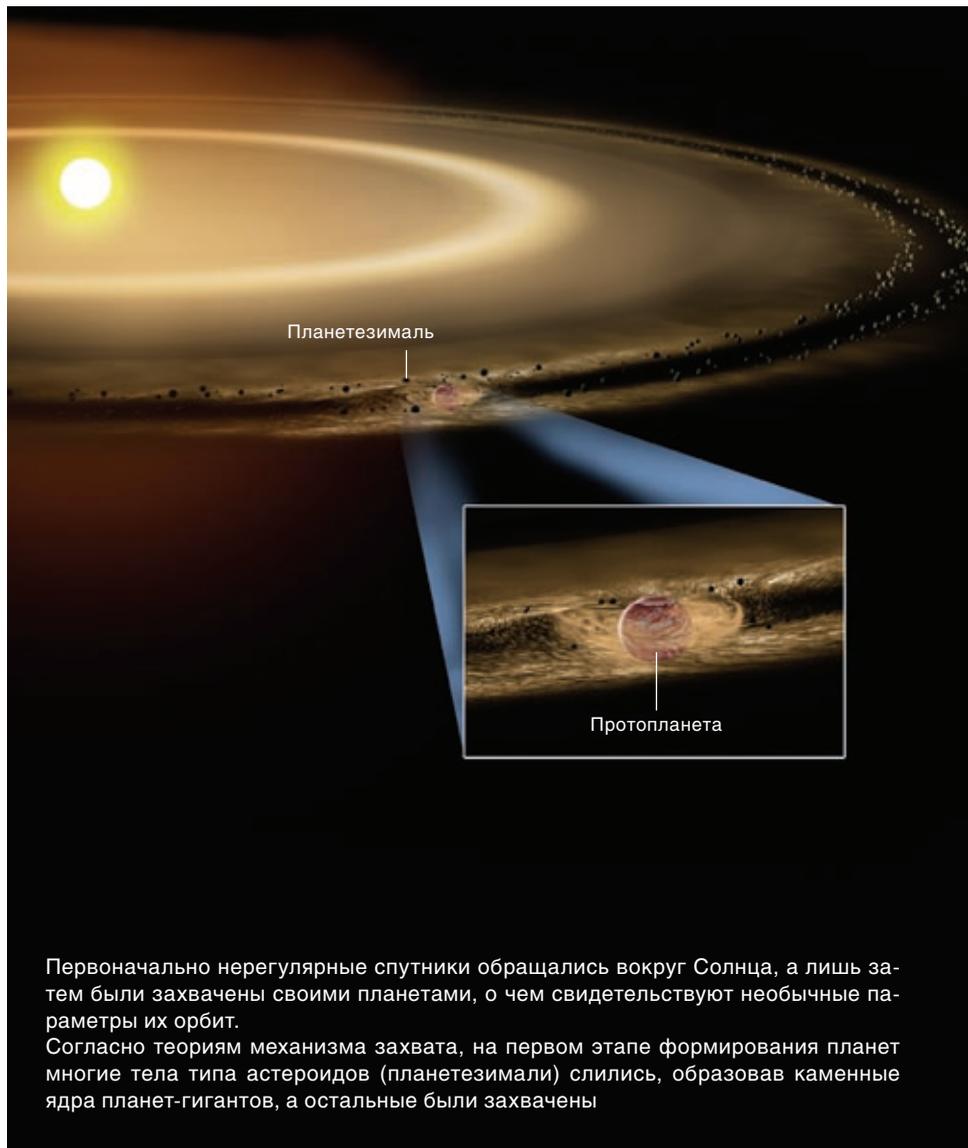
Свойства нерегулярных спутников, особенно их обратные орбиты, говорят о том, что они, вероятно, являются остатками «строительного материала» формировавшихся планет. Как астероиды и ядра комет, они сначала обращались вокруг Солнца, а затем были захвачены планетами. В сложном взаимодействии гравитации планет и Солнца астероиды и кометы временно захватываются на орбиты вокруг планет-гигантов.

Например, знаменитая комета D/Шумейкер-Леви 9 («D» от англ. *defunct* — «более не существующий») была захвачена на временную орбиту вокруг Юпитера и в 1994 г. упала на планету. Если бы этого не случилось, то она была бы через сотни лет вновь выброшена на гелиоцентрическую орбиту. Нечто подобное мы наблюдаем на Земле, когда сухие листья подхваченные вихрем, некоторое время кружатся, а затем вырываются из его объятий и разлетаются в разные стороны. Астрономам известно о нескольких объектах, вернувшихся в окосолнечное пространство после временного захвата Юпитером.

Но чтобы тело навсегда было захвачено с гелиоцентрической на стабильную орбиту вокруг планеты, оно должно потерять некоторую часть своей исходной энергии, иными словами, затормозиться. Сейчас в Солнечной системе нет эффективных механизмов диссипации энергии, поэтому эти события должны были произойти очень давно, когда Солнечная система обладала иными свойствами. В 1970-х гг. теоретики предложили три вероят-

### ОБ АВТОРАХ

**Дэвид Джевит** (David Jewitt) — профессор Гавайского университета и член Национальной академии наук; **Скотт Шеппард** (Scott S. Sheppard) недавно защитил диссертацию в отделе земного магнетизма Института Карнеги в Вашингтоне; **Ян Клейна** (Jan Kleyna) сейчас работает в Гавайском университете, изучая темную материю и карликовые галактики.



Первоначально нерегулярные спутники обращались вокруг Солнца, а лишь затем были захвачены своими планетами, о чем свидетельствуют необычные параметры их орбит.

Согласно теориям механизма захвата, на первом этапе формирования планет многие тела типа астероидов (планетезимали) слились, образовав каменные ядра планет-гигантов, а остальные были захвачены

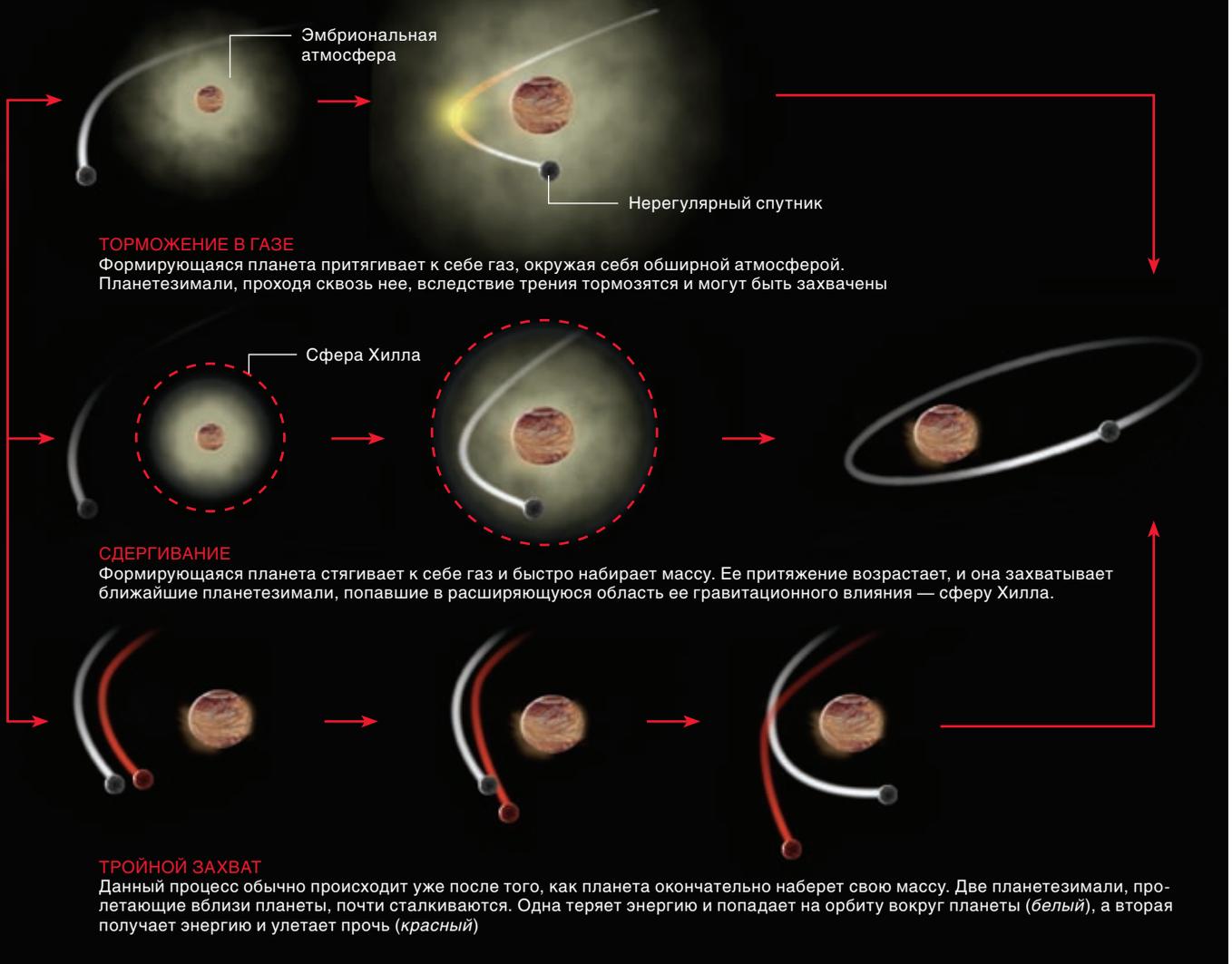
новых сценария захвата спутников, которые могли действовать во время или сразу после формирования планет.

Джеймс Поллак (James B. Pollack) и Джозеф Барнс (Joseph A. Burns) из Эймсовского исследовательского центра NASA и Майкл Таубер (Michael E. Tauber) из Корнелльского университета предположили, что спутники могут терять энергию из-за трения при пролете сквозь протяженные атмосферы зародышей газовых планет-гигантов. Юпитер и Сатурн, в отличие от Земли и других планет земной группы, в основном состоят из водорода и гелия. Скорее всего, они образовались, когда ядро

из камня и льда массой около 10 земных масс притянуло к себе огромное количество газа из протопланетного диска, окружавшего молодое Солнце. Прежде чем принять свой современный довольно компактный размер, эти планеты должны были пройти через промежуточную «раздутую» фазу, когда их атмосферы были в сотни раз протяженнее, чем сейчас.

Пролетающий мимо астероид или ядро кометы, в зависимости от размера, ожидали три варианта возможного развития событий. Если тело мало, то оно сгорит в протяженной атмосфере как метеор. Слишком большое беспрепятственно

КАК ЗАХВАТИТЬ СПУТНИК



пройдет сквозь нее и продолжит свой путь по орбите вокруг Солнца. Но если оно окажется соответствующего размера, то будет захвачено. Это природный аналог аэроторможения, которое сейчас используется для выведения межпланетных зондов на орбиту. Но такая модель не объясняет присутствие нерегулярных спутников у ледяных гигантов Нептуна и Урана, состоящих в основном из камня и льда и содержащих умеренное количество водорода и гелия. Из-за удаленности от Солнца и малой плотности вещества во внешних областях околосолнечного диска их ядрам потребовалось много времени, чтобы достичь

критической массы, необходимой для захвата газа. Прежде чем это случилось, околосолнечная туманность значительно поредела, и Уран с Нептуном не успели получить протяженные атмосферы, такие как у Юпитера и Сатурна. Как же действовало газовое торможение, если газа было немного?

**Третий — лишний**

Второй механизм захвата спутников также предполагает активность на стадии роста планеты. Аккреция газа на ядро будущего гиганта должна была приводить к ускоряющемуся росту его массы, что вызывало резкое расширение сферы Хилла

вокруг планеты. Астероиды и другие объекты, которым довелось оказаться в это время поблизости, попали в ловушку внезапно возросшей гравитации планеты. Такой механизм захвата был впервые описан Томасом Хеппенхаймером (Thomas A. Heppenheimer) и Кэролин Порко (Carolyn Porco) из Калифорнийского технологического института, и назван захват «сдергиванием».

Как и в случае с газовым торможением, такой сценарий не объясняет присутствия спутников у Нептуна и Урана, ни один из которых не испытал резкого увеличения массы. Большинство моделей указывает, что данные планеты росли медленно, ▶

аккумулируя тела размером с астероиды и ядра комет; а для достижения нынешней массы им понадобились десятки или сотни миллионов лет. Даже Юпитер и Сатурн должны были расти в течение тысячелетий, чтобы быть способными захватывать путем сдергивания другие объекты. Альтернативную модель формирования Урана и Нептуна предложил Алан Босс (Alan Boss) из Института Карнеги в Вашингтоне: вначале эти планеты были такими же массивными, как Юпитер и Сатурн, но затем под влиянием ионизирующего излучения соседних массивных звезд их массы уменьшились. Однако «худеющая» планета скорее будет терять спутники, чем захватывать их.

В обеих моделях (торможения в газе и «сдергивания») нерегулярные спутники захватывались на ран-

нем этапе истории Солнечной системы, вероятно, до того, как Земля достигла современной массы. В 1971 г. Бепи Коломбо (Bepi Colombo) и Фред Франклин (Fred Franklin) предложили третий, совершенно непохожий на ранее известные сценарий, названный тройным захватом: столкновение двух тел в сфере Хилла планеты может рассеять достаточно энергии для захвата одного из них.

Но недавние исследования показали, что не обязательно требуется столкновение. Если три тела обмениваются энергией, то одно из них может увеличить свою энергию за счет других (вариант эффекта гравитационной пращи, который используется для разгона космических зондов). В мае 2006 г. Крейг Эйгнор (Craig Agnor) из Калифорнийского университета в Санта-Круз и Даг

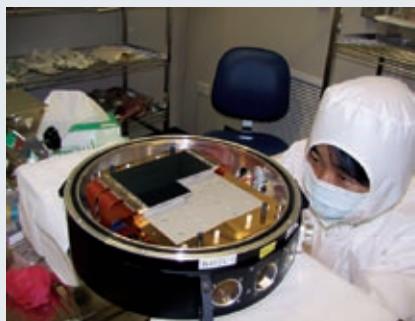
Гамильтон (Doug Hamilton) из Мэрилендского университета предложили иную форму тройного захвата, при которой двойной объект разрывается гравитацией планеты, при этом один из компонентов выбрасывается, а другой выходит на орбиту.

## Планетные перемещения

Новые открытия показали, что все четыре планеты-гиганта окружены нерегулярными спутниками, поэтому внимание исследователей привлечено тройной захват, не требующий обширной газовой оболочки или быстрого роста массы планеты. Для него необходимо лишь достаточное число столкновений или пролетов вблизи планеты, что и могло произойти в конце эпохи формирования планеты: после того как сферы Хилла выросли до нынешних размеров, но до того как оставшиеся

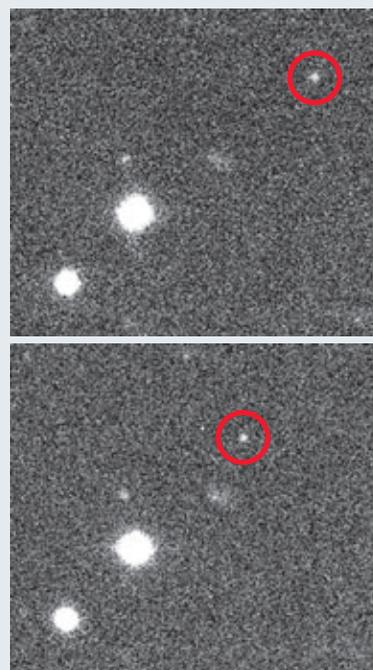
## НАБЛЮДАТЕЛИ НЕБА

Далекие, крошечные, тусклые нерегулярные спутники входят в число наиболее сложных для наблюдения объектов Солнечной системы. Чтобы их обнаружить, нужны самые мощные поисковые телескопы, имеющие большое поле зрения и способные сканировать обширные участки неба. Большинство открытий наша группа сделала с помощью канадско-франко-гавайского телескопа и телескопа «Субару» на горе Мауна-Кеа (Гавайи). На них установлены цифровые приемники света размером более 100 млн. пикселей.



Для обзора больших участков неба одним из лучших приемников служит камера главного фокуса телескопа «Субару» — мозаика из 10 восьмимегапиксельных матриц

Самое сложное — отличить объекты Солнечной системы от далеких звезд и галактик. Мы используем два метода. Первый — измерение расстояния. Мы сравниваем три изображения, полученные в разные ночи. За это время Земля проходит некоторый путь вокруг Солнца, что приводит к видимому изменению положения объекта: чем он ближе, тем больше сдвигается. Второй метод — измерение скорости. Мы получаем десятки изображений одного участка неба и складываем их, смещая друг относительно друга с учетом ожидаемой орбитальной скорости нерегулярного спутника, который мы ищем. На суммарном изображении все звезды выглядят как черточки, а нерегулярные спутники — как яркие пятнышки. Данный метод занимает больше времени, поскольку требуется много изображений одной области неба, зато он более чувствителен к слабым объектам. Чтобы отличить спутники планет от астероидов и комет, мы наблюдаем их несколько месяцев и консультируемся с Брайаном Марсденом (Brian Marsden) из Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра, который рассчитывает их орбиты.



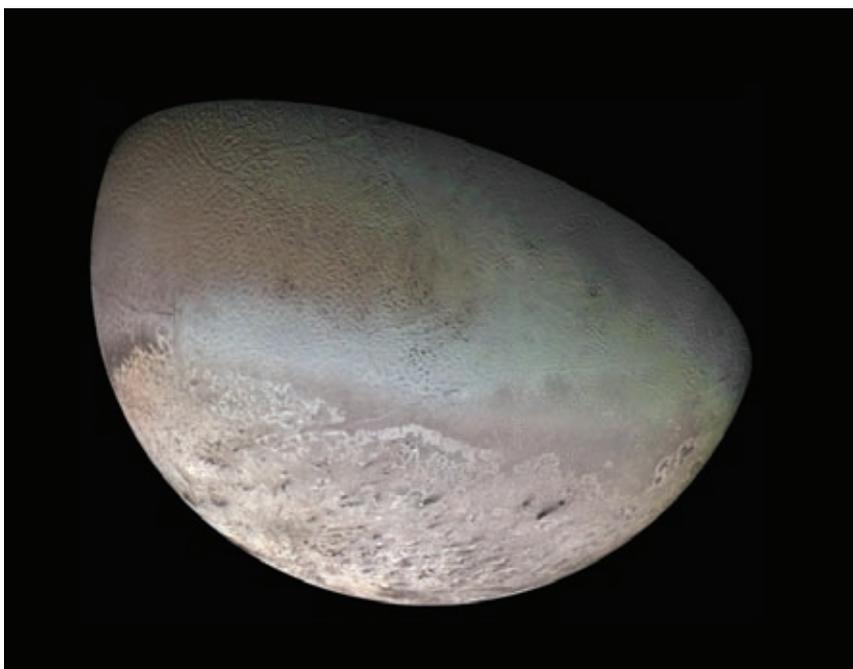
Крошечное пятнышко света: спутник Юпитера *S/2003 J14* был открыт 26 февраля 2003 г. по этим двум снимкам, полученным с разницей в 39 минут. Другие объекты на изображении — звезды фона. Спутник диаметром около 2 км обращается по орбите вокруг гигантской планеты на расстоянии 31 млн. км

от формирования планет планетезимали были выброшены из системы. Тройной захват может объяснить, почему у всех планет-гигантов почти одинаковое число нерегулярных спутников: несмотря на то, что Уран и Нептун не такие массивные, как Юпитер и Сатурн, они расположены дальше от Солнца, и их сферы Хилла имеют сравнимый размер.

Но даже если тройное взаимодействие объясняет, как были захвачены нерегулярные спутники, остается вопрос: откуда они взялись? Предлагается два варианта ответа. Спутники могли быть астероидами и ядрами комет, находившимися в той же области Солнечной системы, что и планеты, которые, в конечном счете, захватили их. Большинство планетезималей внедрились в тело планеты или же были выброшены из Солнечной системы. Нерегулярным спутникам повезло: они не были «съедены» или отправлены скитаться в межзвездное пространство.

Другую возможность предлагает новая модель, в которой Солнечная система была «засорена» планетезималами еще примерно 700 млн. лет после окончания формирования планет. Затем в результате мощного гравитационного взаимодействия Юпитера с Сатурном миллиарды астероидов и комет были хаотически рассеяны в процессе перехода больших планет на их современные стабильные орбиты. Некоторые из блуждающих тел могли быть захвачены. В этом сценарии, предложенном в прошлом году Клеоменисом Тсиганисом (Kleomenis Tsiganis) и его коллегами из Обсерватории Лазурного Берега, большинство рассеянных тел сформировалось в поясе Койпера, за орбитой Нептуна.

Изучение систем нерегулярных спутников продолжается. Но исследователи уже сделали определенные выводы. Во-первых, захват спутников произошел на раннем этапе эволюции Солнечной системы — либо при формировании планет, либо сразу же после этого, т.к. в современной Солнечной системе просто нет условий для захвата спутников.



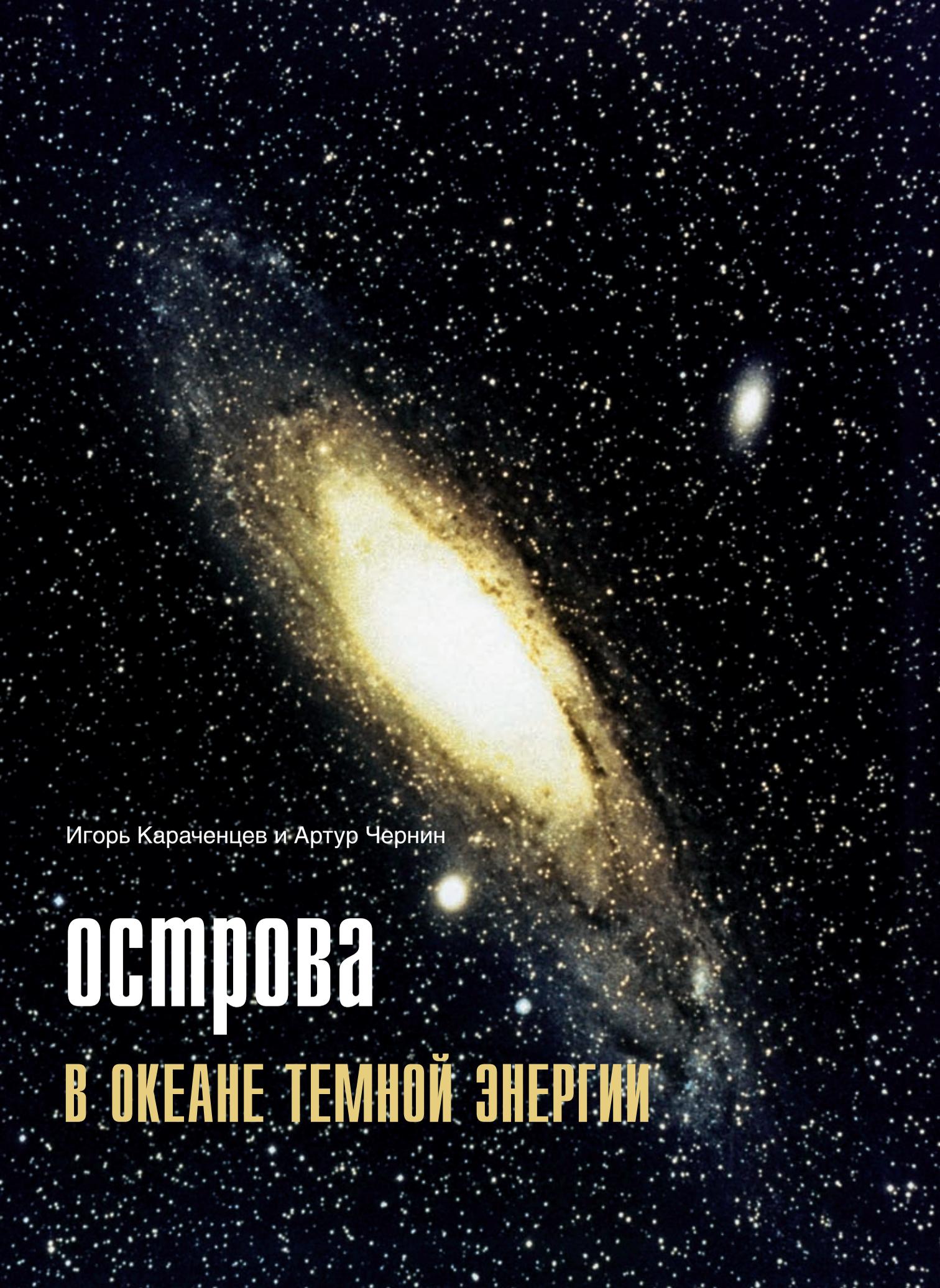
Крупнейший нерегулярный спутник, Тритон у Нептуна, удивляет астрофизиков с момента его открытия в 1846 г. Последние исследования указывают на то, что он со своим спутником перемещался вокруг Солнца, пока Нептун не разделил их и не захватил Тритон

Во-вторых, схожесть систем нерегулярных спутников у всех четырех внешних планет-гигантов свидетельствует о том, что они возникли в результате тройного захвата — единственного механизма, который

годится как для Нептуна, так и для Юпитера. Таким образом, нерегулярные спутники, скапливающиеся вокруг планет-гигантов, рассказывают нам о событиях прошлого, свидетелями которых мы не были. ■

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Белецкий В.В. Очерки о движении космических тел. М.: Наука, 1977.
- Демин В.Г. Судьба Солнечной системы: Популярные очерки о небесной механике. М.: Наука, 1975.
- Ипатов С.И. Миграция небесных тел в Солнечной системе. М.: Эдиториал УРСС, 2000.
- Рябов Ю.А. Движение небесных тел. М.: Наука, 1988.
- The Discovery of Faint Irregular Satellites of Uranus. J. J. Kavelaars et al. in *Icarus*, Vol. 169, No. 2, pages 474–481; June 2004.
- Discovery of Five Irregular Moons of Neptune. Matthew J. Holman et al. in *Nature*, Vol. 430, pages 865–867; August 19, 2004.
- Photometry of Irregular Satellites of Uranus and Neptune. Tommy Grav, Matthew J. Holman and Wesley C. Fraser in *Astrophysical Journal*, Vol. 613, No. 1, pages L77–L80; September 2004. Available online at [arxiv.org/abs/astro-ph/0405605](http://arxiv.org/abs/astro-ph/0405605)
- Irregular Satellites in the Context of Giant Planet Formation. David Jewitt and Scott Sheppard in *Space Science Reviews*, Vol. 116, Nos. 1–2, pages 441–456; January 2005.
- Cassini Imaging Science: Initial Results on Phoebe and Iapetus. C. C. Porco et al. in *Science*, Vol. 307, pages 1237–1242; February 25, 2005.
- Neptune’s Capture of Its Moon Triton in a Binary-Planet Gravitational Encounter. Craig B. Agnor and Douglas P. Hamilton in *Nature*, Vol. 441, pages 192–194; May 11, 2006. Hawaii Irregular Satellite Survey Web site: [www.ifa.hawaii.edu/jewitt/irregulars.html](http://www.ifa.hawaii.edu/jewitt/irregulars.html)



Игорь Караченцев и Артур Чернин

**острова**

**В ОКЕАНЕ ТЕМНОЙ ЭНЕРГИИ**

**Г**алактики — лишь небольшая примесь «обычного» вещества, разбросанного сгустками в космическом пространстве на однородном фоне темной энергии, т.е. энергии космического вакуума. Она создает всемирное антигравитационное и заставляет галактики удаляться от нас и друг от друга с возрастающими со временем скоростями. Темная энергия дает о себе знать не только на огромных космологических расстояниях, где ее впервые обнаружили, но и вблизи нас, совсем недалеко от Млечного Пути.

### **Галактики, скопления, сверхскопления**

В 1922–1924 гг. эстонский теоретик, выпускник Московского университета Эрнст Эпик (Ernst Opik), работавший тогда в Москве, и американский астроном Эдвин Хаббл (Edwin Hubble) из обсерватории Маунт-Вилсон в Калифорнии независимо друг от друга и притом совершенно разными путями доказали, что знаменитая туманность Андромеды находится вне нашей галактики. Распространенная ранее точка зрения состояла в том, что галактика, которая видна на небе как Млечный Путь, это и есть чуть ли вся Вселенная. Оказалось, что туманность Андромеды представляет собой гигантскую систему звезд, сравнимую с нашей галактикой по размерам и массе, а то и превосходящую ее.

Вскоре после этого Хабблу и его коллегам удалось установить природу еще двух десятков ближайших к нам туманностей, которые тоже оказались звездными системами, хотя и не такими крупными, как наша галактика или туманность Андромеды. С тех пор стало ясно, что Вселенная — это не мир звезд, как считали веками, а мир галактик.

Дальнейшие наблюдения показали, что большинство галактик собрано в различные группы и скопления, насчитывающие от нескольких единиц до сотен и тысяч звездных систем различной массы и размеров. Наша галактика вместе с галактикой Андромеды и четырьмя десятками менее крупных галактик

образуют Местную группу, находящуюся по соседству со скоплением галактик в Деве, которое составляет вместе с несколькими другими систему, называемую Местным сверхскоплением. Это гигантское образование имеет уплощенную форму, и его наибольший размер достигает 80 млн. световых лет.

Сверхскопления нередко образуют длинные цепочки, или филаменты, в которые входит по 5–20 сверхскоплений разного размера. Самая богатая из близких к нам цепочек — Концентрация Шепли. Она находится от нас на расстоянии около 500 млн. световых лет и имеет протяженность до 300 млн. световых лет.

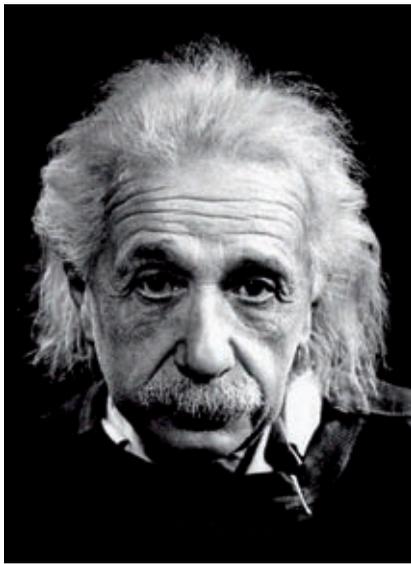
Иерархия астрономических систем не продолжается неограниченно до сколь угодно больших масштабов; она ограничена десятками сверхскоплений. Это означает, что скопления и сверхскопления распределены в пространстве в среднем равномерно. Если мысленно выделить в объеме Вселенной области с размером в 1 млрд. световых лет (или более) и подсчитать в каждой из них число галактик, то оно окажется практически одинаковым для всех таких областей. То же самое будет и при подсчете скоплений и сверхскоплений. Объем поперечником в 1 млрд. световых лет, начиная с которого распределение галактик представляется в среднем равномерным по пространству, называют ячейкой однородности во Вселенной.

Современным наблюдениям доступен объем пространства радиусом около 15 млрд. световых лет. Рассматриваемый в таком огромном космологическом масштабе, мир галактик выглядит простым, однородным и бесструктурным.

### **Разбегание галактик**

Американский астроном Весто Слайфер (Vesto Slipher) и Эдвин Хаббл в течение 1917–1929 гг. открыли, что галактики не стоят на месте, а движутся, и притом все они (кроме самых близких к нам, таких как туманность Андромеды) удаляются ▶

**Вселенная — мир галактик и вакуума. Недавние исследования показали, что галактики и все тела природы погружены в неведомую ранее космическую среду, получившую название «темная энергия». На эту среду приходится приблизительно 75% всей энергии и массы Вселенной**



Альберт Эйнштейн выдвинул в 1917 г. гипотезу всемирного антитяготения, которая была подтверждена астрономическими наблюдениями в 1998–1999 гг.

от нас и друг от друга. Разбегание галактик было обнаружено по спектрам принимаемого от них света. Оказалось, что спектральные линии сдвинуты (по сравнению с их «лабораторным» положением) в сторону больших длин волн, т.е. в сторону красного конца спектра. Такой сдвиг спектральных линий, «красное смещение», возникает всегда, когда расстояние между источником и приемником света возрастает со временем (эффект Доплера). Разбегание галактик, обнаруженное первоначально в близкой к нам области Вселенной (до расстояний всего в 50 млн. световых лет), прослеживается сейчас во всем мире галактик, реально доступном наблюдениям. Когда речь идет о самых больших, космологических расстояниях, превышающих размер космической ячейки однородности, об этом явлении природы говорят как об общем расширении Вселенной.

Космологическое расширение было теоретически предсказано в 1922 г. петроградским математиком Александром Александровичем Фридманом. Основываясь на общей теории относительности Эйнштейна, он доказал, что однородный мир не может находиться в покое и должен либо расширяться, либо сжиматься. Раз

Вселенная расширяется, это значит, что всему ее веществу некогда были приданы гигантские скорости разбега в результате изначально-го космического события, получившего название Большого взрыва. Его физическая природа до сих пор остается загадкой.

А.А. Фридман рискнул ориентировочно определить, как далеко в прошлом от нас локализован момент Большого взрыва. По его оценке, космологическое расширение началось 10 млрд. лет назад, если считать по порядку величины (т.е. с точностью до степени десятки в ее численном выражении). Эта приближенная оценка хорошо согласуется с самыми последними наблюдательными данными, согласно которым мир начал свое существование около 15 млрд. лет назад. По этой причине лучи света, которые мы сейчас принимаем, не могли быть испущены раньше, и, соответственно, свет мог пройти за это время путь не больше такого же количества световых лет. Следовательно, 15 млрд. световых лет — это предельно далекое состояние, доступное наблюдениям, принципиальный горизонт видимости в реальном мире.

Самые далекие источники света, галактики и квазары, лежат на расстояниях как раз около 10 млрд. световых лет, т.е. вблизи космического горизонта. Это, очевидно, означает, что при существующей дальности действия астрономических инструментов объектом прямых наблюдательных исследований в XXI в. становится почти весь принципиально доступный наблюдениям объем Вселенной.

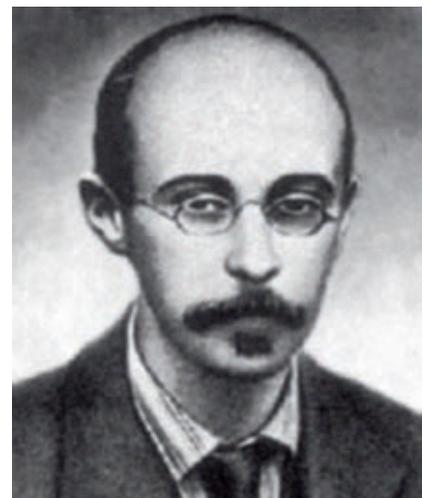
Своими современными успехами наука о Вселенной обязана быстрому росту арсенала астрономической техники. Если в распоряжении Хаббла был немалый по тем временам телескоп с зеркалом диаметром 2,5 м, то уже почти три десятка лет действует шестиметровый телескоп Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) на Северном Кавказе, а недавно введены в строй два телескопа диаметром 10 м. на Гавайях

(США) и несколько международных телескопов диаметром 8 м в Чили. На стадии конструирования находятся еще гораздо более крупные телескопы с мозаикой зеркал, а не со сплошным зеркалом. По своей эффективности они эквивалентны телескопам с диаметром сплошного зеркала в 30 и 100 м. Во времена Хаббла в дело шел только 1% света, падающего на зеркало. Современные приемники света (приборы с зарядовой связью) улавливают почти 100% света небесных источников.

Астрономические наблюдения ведутся сейчас как с помощью наземных инструментов, так и на космических обсерваториях. На орбите вокруг Земли находится американский космический телескоп «Хаббл» (рис. на стр. 34) с зеркалом диаметром 2,4 м (почти в точности как у Хаббла в Маунт-Вилсон). Специализированные орбитальные обсерватории наблюдают Вселенную в инфракрасных, ультрафиолетовых, рентгеновских и гамма-лучах.

### Парадокс Хаббла-Сэндиджа

Вернемся к истокам наблюдательной космологии, в 1920-е гг., когда Хаббл изучал только что открытый феномен разбегания галактик. В его распоряжении имелись измеренные Слайфером скорости удаления



Александр Александрович Фридман построил в 1922–1924 гг. теорию космологического расширения с учетом эйнштейновского антитяготения; это основа основ современной космологии

галактик, но расстояния до них не были еще определены. К 1929 г. Хабблу удалось оценить расстояния для двух десятков галактик, и это немедленно привело его к замечательному открытию: оказалось, что скорости удаления галактик пропорциональны расстояниям до них. Этот факт называют с тех пор законом Хаббла (рис. на стр. 35).

Теория Фридмана говорит нам, что закон прямой пропорциональности скорости и расстояния — это обязательное и неизбежное следствие однородности распределения вещества. Раз Вселенная однородна по распределению вещества, ее расширение может происходить по этому и только этому закону. И наоборот: расширение по закону прямой пропорциональности возможно только в однородном мире.

Казалось бы, очевидна полная гармония космологической теории и астрономических наблюдений. Но если внимательнее приглядеться к оригинальной хаббловской диаграмме, то можно увидеть, что расстояния до галактик на ней (после устранения систематической ошибки) не превышают 50 млн. световых лет, или 18 мегапарсек (если пользоваться этой единицей длины, принятой во внегалактической астрономии; 1 мегапарсек [Мпк]=1 миллион парсек; 1 парсек близок к трем световым годам). А свое начало поток расширения берет на ней всего на расстоянии в 1–2 Мпк от нас.

Но единицы и десятки мегапарсек — это отнюдь не космологический масштаб. Это гораздо меньше размера ячейки однородности во Вселенной, начиная с которой однородность распределения вещества имеет место в действительности. В нашей же ближайшей галактической окрестности, в объеме, который наблюдал Хаббл, никакой однородности в распределении вещества нет и в помине. Напротив, галактики расположены здесь крайне нерегулярно, имеются сильные сгущения, галактики образуют группы с размерами около 1 Мпк, они входят в Местное сверхскопление, центр которого лежит



Эдвин Хаббл открыл в 1929 г. феномен разбегания галактик и сформулировал закон движения галактик, носящий его имя

в направлении на созвездие Девы и находится на расстоянии в 17 Мпк. Как при таких условиях может существовать регулярный поток расширения с законом прямой пропорциональности скорости и расстояния? Ведь по теории Фридмана этот закон возможен лишь в случае однородного распределения вещества в пространстве.

Первым (еще в начале 1970-х гг.) обратил внимание на этот странный факт американский астроном Алан Сэндидж (Allan Sandage), некогда сотрудник Хаббла, продолжатель его научной традиции во внегалактической астрономии. Особенно загадочным казалось Сэндиджу

одно обстоятельство. Дело в том, что темп разбегания галактик характеризуют отношением расстояния до галактики к скорости ее удаления от нас. Это отношение называют постоянной Хаббла. Она постоянна в том смысле, что ее средняя величина не зависит ни от направления на галактику, ни от расстояний в мире галактик. На больших расстояниях, превышающих размер ячейки однородности, т.е. в области «истинно космологических» масштабов, измеренное значение «глобальной» постоянной Хаббла составляет, по последним данным, полученным американской орбитальной лабораторией WMAP ▶

(*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*),  $572 \mu\text{m}$   $4\text{S}$  км/с на Мпк. Но измеренная и внутри ячейки однородности, на расстояниях от 4 до 300 Мпк, постоянная Хаббла составляет, по данным (2006 г.) группы Сэндиджа,  $564 \mu\text{m}$   $7\text{S}$  км/с на Мпк, то есть допустимые в обоих случаях интервалы значений этой величины перекрываются. Общая картина разбегания галактик выглядит так, как если бы глобальный космологический поток начинался прямо вблизи нас и, простираясь далее чуть не до горизонта мира, сохранял всюду свою кинематическую идентичность. Но как же это может быть?

Таков парадокс, существующий в космологии со времен Хаббла. Через 70 лет после открытий Хаббла,

в 1999 г., Сэндидж писал: «Мы так и остаемся с этой тайной».

### Местный хаббловский поток

По понятным причинам самый острый интерес вызывает тот удивительный факт, что регулярный хаббловский закон разбегания галактик наблюдается в нашем ближайшем галактическом окружении на расстояниях всего в несколько Мпк. Новейшие данные о движении галактик в области экстремально малых галактических масштабов получены одним из авторов (И.Д. Караченцевым) вместе с его сотрудниками в Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) в кооперации с астрономами США, Герма-

нии и Украины. Это результат многолетних тщательных наблюдений около 200 близких галактик, нацеленных на то, чтобы заново и максимально точно определить их скорости и расстояния до них. В работе использовался космический телескоп «Хаббл» (в общей сложности в течение почти двухсот орбитальных периодов) и Большой телескоп САО РАН. Основной вывод состоит в том, что на гораздо большем наблюдательном материале и с более высокой степенью точности, чем это было возможно до сих пор, подтверждено и продемонстрировано существование регулярного потока расширения с хаббловским законом скорости для расстояний до 8 Мпк. Особенно важно было установить, что регулярный поток разбегания галактик начинается в области около 1,5–2 Мпк от нас: начиная с этих расстояний, закон Хаббла уже уверенно прослеживается.

Летом 2000 г. другой автор этой статьи (А. Чернин) представил доклад о парадоксе Хаббла–Сэндиджа («Почему хаббловский поток такой спокойный?») на международном космологическом симпозиуме, проходившем в рамках конгресса *COSPAR* (*Committee on Space Research*) в Варшаве. В нем было впервые выдвинуто предположение о том, что хаббловским потоком управляет темная энергия. Она имеет всюду идеально однородную плотность, доминирует во Вселенной по энергии и потому контролирует темп разбегания галактик во всех масштабах — от расстояний 1–2 Мпк и до границ видимой Вселенной. Это и есть физическая причина, по которой разбегание галактик оказывается всюду столь спокойным, то есть регулярным, и почти строго следует закону Хаббла. Темная энергия была только что (в 1998–1999 гг.) открыта в наблюдениях очень далеких галактик.

### Темная энергия

Об открытии темной энергии в космологии теперь уже много написано (см.: Клайн Д. *Поиски темного вещества* // *ВМН*, № 7, 2003; Массер

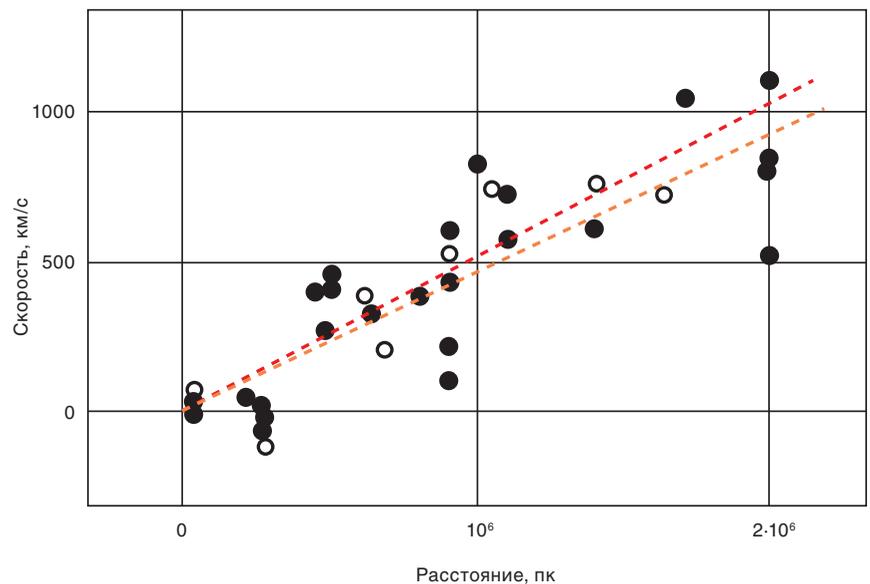


Космический телескоп «Хаббл» (*HST*), орбитальный телескоп NASA (США), в полете. Наблюдения, о которых рассказывается в статье, проводились на этом телескопе на протяжении 200 его орбитальных периодов

Д. Замороженные звезды // *ВМН*, № 10, 2003; Двейли Д. Кто нарушил закон тяготения // *ВМН*, № 5, 2004; Дрейфус К. и Кросс Л. Что беспокоит физиков? // *ВМН*, № 11, 2004; Массер Д. Темная энергия охлаждает окрестности нашей галактики // *ВМН*, № 7, 2005; Черпащук А.М. и Чернин А.Д. Вселенная. Жизнь, черные дыры. Фрязино: Век-2, 2003). В 1998–1999 гг. были опубликованы первые данные наблюдений, указывающих на то, что космологическое расширение происходит ускоренно, т.е. что скорости взаимного удаления галактик возрастают со временем. Раньше считали, что разбегание галактик может только замедляться под действием всемирного тяготения. Однако ускорение означает, что в природе имеется не только всемирное тяготение, но и всемирное антитяготение, которое преобладает над тяготением в наблюдаемой Вселенной. Антитяготение создается не галактиками (с их обычными светящимся барионным веществом и темной материей), а некоей космической средой, в которую погружены все галактики мира. Эта гипотетическая среда — темная энергия.

Физическая природа темной энергии остается пока что неизвестной. По этому поводу, однако, высказано немало интересных гипотез, простейшая из которых (и, похоже, самая вероятная) связывает темную энергию с космологической константой. Эта универсальная константа была введена в космологию и физику Эйнштейном в 1917 г., на заре современной науки. Если эйнштейновская константа положительна по величине, то теория Фридмана (а в ней эта константа с самого начала учитывалась) может описывать космологическое расширение не только с замедлением, но и с ускорением. Этот вариант мировой динамики и осуществляется, как оказалось, в реальной Вселенной.

Но какая физика стоит за космологической константой? Сам Эйнштейн не оставил ответа на этот вопрос. По мысли петербургского теоретика Эраста Борисовича Гли-



Закон Хаббла: линейная зависимость скорости удаления галактик от расстояния до них. Оригинальная диаграмма 1929 г. Расстояния у Хаббла были в 1929 г. определены с немалой систематической ошибкой, все они на самом деле в 8 раз больше, чем он тогда полагал

нера, высказанной еще в 1965 г., космологическая константа описывает вакуум. Этот вакуум — отнюдь не пустота. Его можно представить себе как особую сплошную среду, которая идеально равномерно заполняет всю Вселенную и имеет всюду и всегда постоянную плотность. Плотность вакуума положительна, а его давление отрицательно. Из-за отрицательного давления и возникает не тяготение, а антитяготение.

Если в такую среду поместить две частицы, то вакуум способен преодолеть их взаимное тяготение и заставить их удаляться друг от друга, притом с ускорением, т.е. с возрастающими со временем скоростями. Этот вакуум Эйнштейна-Глинера вероятнее всего и управляет динамикой наблюдаемой Вселенной.

С открытием вакуума (если темная энергия — это действительно энергия вакуума Эйнштейна-Глинера) Вселенная в целом предстала перед нами более однородной, чем об этом можно было судить ранее только по распределению галактик в ней. Действительно, в наблюдаемом мире доминирует вакуум с его идеально однородной плотностью. По величине эта плотность составляет (в круглых цифрах) 75% полной плотности

Вселенной. Таковы данные, известные с 1998–1999 гг. и подтвержденные позднее, в 2003 и 2006 гг., независимыми наблюдениями, выполненными на уже упомянутом американском космическом аппарате *WMAP*. Это означает, что «обычное» вещество, из которого состоят галактики (включая и так называемую темную материю, которую не следует путать с темной энергией) заметно уступает вакууму по своей средней (мысленно распределенной по всему пространству) плотности. Соответственно вакуум вносит ▶

## ОБ АВТОРАХ

**Артур Давидович Чернин** — доктор физико-математических наук, профессор Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга, МГУ. Область научных интересов — космология, физика галактик.

**Игорь Дмитриевич Караченцев** — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией внегалактической астрономии в Специальной астрофизической обсерватории РАН. Область исследований — наблюдательная космология, внегалактическая астрономия.

подавляющий вклад в полную массу и энергию Вселенной.

Насколько известно, Эйнштейн и его последователи интересовались действием антитяготения на Вселенную в целом и, кажется, не задавались вопросом о его возможных локальных эффектах. Но вакуум Эйнштейна-Глинера присутствует везде в мире, в каждом, можно сказать, кубическом сантиметре его объема. Поэтому благодаря вакууму реальная Вселенная оказывается однородной не только в собственно космологических масштабах 300 Мпк и более. В действительности она однородна вокруг нас уже на расстояниях в несколько Мпк. Простые оценки показывают, что тяготение Местной группы галактик преобладает на расстояниях

только до приблизительно 1,5 Мпк от центра Местной группы. А дальше вплоть до других групп и скопления галактик почти безраздельно господствует антитяготение космического вакуума. Там, где доминирует темная энергия вакуума, галактики местного хаббловского потока движутся почти как «пробные частицы» на идеально регулярном фоне темной энергии, которая разгоняет их своим антитяготением.

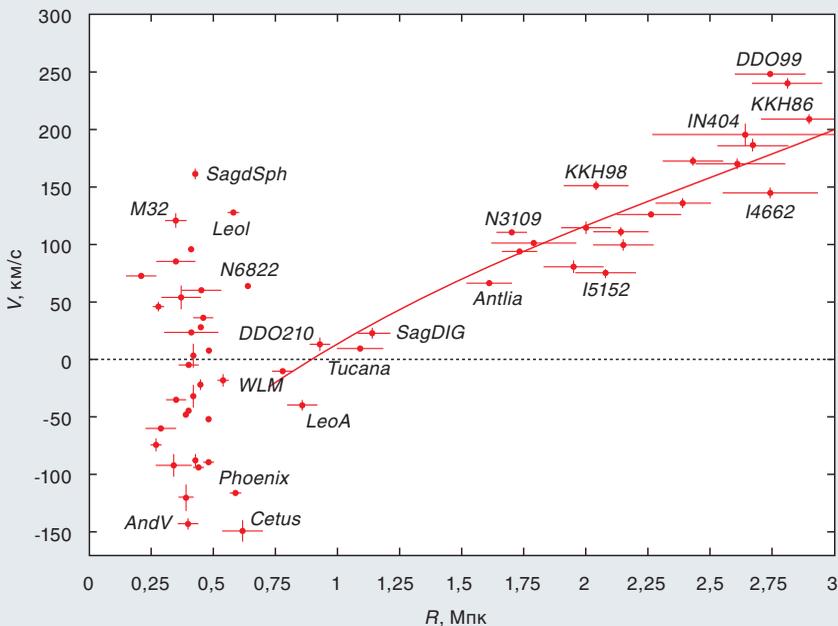
Такая картина местного хаббловского потока прямо вытекает из наших наблюдений и описывается разработанной нами компьютерной моделью. В этой работе вместе с авторами этой статьи участвовали Пекка Теерикорпи (Pekka Teerikorpi), Маури Валтонен (Mauri Valtonen) (Университет Турку, Финляндия),

Джин Берд (Jean Bird) (Университет Алабамы, США), Юрий Николаевич Ефремов, Валентин Петрович Долгачев, Людмила Михайловна Доможилова (ГАИШ МГУ), Юрий Викторович Барышев (СПбГУ), Дмитрий Игоревич Макаров (САО РАН).

Ключевой момент нашей модели – кинематическая идентичность хаббловского потока на масштабах от нескольких Мпк до самых больших расстояний в мире галактик. Эта загадка, еще недавно ставившая в тупик космологов, теперь разъясняется: везде, где доминирует вакуум с его всюду одинаковой плотностью, темп расширения (характеризуемый постоянной Хаббла) должен быть практически одинаков. Дело в том, что при таких условиях постоянная Хаббла определяется почти

**Современная диаграмма скорость-расстояние для ближайших галактик (по данным И.Д. Караченцева).**

Радиальные скорости и расстояния галактик даны в системе отсчета, связанной с центром Местной группы. Скорости считаются положительными, если галактика удаляется от центра группы, и отрицательными, если она приближается к нему. Вертикальные и горизонтальные отрезки при каждой точке указывают на величину ошибки измерения соответственно скорости и расстояния. Для почти 80% ближайших (до 3 Мпк) галактик расстояния были впервые измерены в последние годы группой Караченцева с помощью космического телескопа «Хаббл». У левого края рисунка (до расстояний 0,7 Мпк) располагаются галактики Местной группы, которые показывают разброс скоростей до 150 км/с. Две главные галактики группы — Млечный путь и галактика в Андромеде — находятся на расстояниях соответственно 0,43 и 0,35 Мпк от центра группы и движутся по направлению к ее центру со скоростями соответственно -88 и -35 км/с относительно центра. Сплошная линия, проведенная по наблюдательным точкам, указывает на линейную зависимость скорости



от расстояния (закон Хаббла), начиная с расстояний 1,5–2 Мпк от центра Местной группы. Замечательно, что на расстояниях, превышающих 1,5–2 Мпк, наклон этой линии соответствует значению постоянной Хаббла  $H = 72 \text{ км/с/Мпк}$ , что почти точно совпадает с величиной, измеренной по глобальным космологическим наблюдениям. Разброс галактик вокруг этой средней хаббловской линии очень мал, он не

превышает 28 км/с. Если же из этой величины вычесть разброс, связанный с ошибками наблюдений, то реальные отклонения галактик от закона галактик опускаются всего до 18 км/с. Столь малый разброс скоростей, найденный совсем недавно группой Караченцева, представляет собой факт фундаментального значения: он определенно указывает на присутствие темной энергии сразу за порогом Местной группы.

исключительно одной только плотностью вакуума. В теоретически мыслимом предельном случае, когда в мире безраздельно царит вакуум, постоянная Хаббла должна быть во всей области масштабов от нас и до края Вселенной строго одинакова. Предельное значение постоянной составляет приблизительно 60 км/сек на Мпк, оно совсем не далеко от величин, получаемых в реальных астрономических наблюдениях.

Стоит отметить, что Сэндидж и его коллеги поддержали наши результаты, заявив, что «у идеи вакуума в настоящее время нет жизнеспособных альтернатив». Развитая нами теоретическая модель была позднее подтверждена также обширными независимыми вычислениями, проделанными международной группой астрономов под руководством Фаббио Говернато (Университет Сиэтла, США). Наша модель хорошо согласуется также с общей картиной формирования космических структур в масштабе нескольких Мпк, развиваемой группой Дж. Острайкера (Принстонский университет, США).

Теперь стало очевидным, что космология начинается не с сотен мегапарсек, а всего в нескольких мегапарсеках от нас. И все это из-за преобладания вакуума как по Вселенной в целом, так и в отдельных ее объемах, подобных нашему местному. Новый взгляд на космологию подсказывает разгадку тайны, которая долгие годы существовала в науке о Вселенной. Удивительно, но факт: только с обнаружением темной энергии стали по-настоящему ясны реальное космологическое значение и истинный физический смысл открытия, сделанного Хабблом в 1929 г.

Но на эти результаты можно взглянуть также и с другой стороны. Действительно, кинематику местного хаббловского потока, изученную нами с помощью высокоточных наблюдений и новой теории, нужно считать теперь прямым свидетельством того, что темная энергия существует не только на огромных космологических расстояниях, где она была



впервые обнаружена, но и фактически повсюду во Вселенной, везде, где наблюдается регулярное хаббловское разбегание галактик. Отсюда вытекает, что такую важную физическую величину, как плотность темной энергии можно оценить по измеренному значению постоянной Хаббла. Более того, возможна и еще одна независимая оценка той же величины: она следует из нашей теории и численно дается комбинацией двух наблюдаемых величин — массы Местной группы галактик (около 1,5 трлн. масс Солнца) и расстояния (примерно 1,5 Мпк), начиная с которого разбегание галактик обнаруживает регулярный хаббловский характер. Наши оценки находятся в полном согласии друг с другом и с глобальными данными, полученными в 1998–1999 гг. при наблюдениях далеких галактик. Это означает, что темная энергия является универсальным феноменом природы, а создаваемое ею антигравитационное воздействие оказывается всемирным в том же смысле, что и ньютоново всемирное тяготение.

Исследования темной энергии разворачиваются в наши дни широким фронтом. Инструментом, подаренным нам для этих целей самой природой, служит весь мир галактик — от границ наблюдаемой Вселенной до близких окрестностей Млечного пути. ■

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Черпащук А.М., Чернин А.Д. Горизонты Вселенной. Новосибирск, СО РАН, 2005.
- Тропп Э.А., Френкель В.Я., Чернин А.Д. Александр Александрович Фридман. Жизнь и деятельность. М.: Наука, 1988; Эдиториал УРСС, 2006.
- Новиков И.Д., Шаров А.С. Эдвин Хаббл. М.: Наука, 1989.
- Ефремов Ю.Н. Вглубь Вселенной. Звезды, галактики и мироздание. М.: Эдиториал УРСС, 2004.
- Ефремов Ю.Н. Звездные острова. Галактики звезд и Вселенная галактик. Фрязино: Век-2, 2005.
- Черпащук А.М., Чернин А.Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. Фрязино: Век-2, 2003.

Томас Джексон

# двигатель для космолана



## Создание принципиально нового двигателя, благодаря которому полеты в космос станут дешевле и доступнее, — сложная, но выполнимая задача

**Н**а протяжении многих лет инженеры мечтали о создании летательного аппарата, способного со взлетной полосы уйти в космос и тем же путем вернуться на землю — как это делает крестокрылый истребитель Люка Скайуокера в «Звездных войнах». Однако для поддержания горения топлива в реактивном двигателе необходим кислород, а в верхних слоях атмосферы с этой точки зрения его недостаточно. Таким образом, для полетов в космос можно использовать только ракетные двигатели с запасом топлива и окислителя в баках, что составляет половину взлетного веса современного космического корабля.

Однако есть и другие технические решения. Например, в летательном аппарате с прямоточным двигателем, работающем в сверхзвуковом режиме, используется атмосферный кислород, что позволяет увеличить полезную нагрузку в четыре раза в пересчете на единицу топлива. Такой подход был применен при создании двухступенчатой космической системы, включающей ракетоплан «Квиксат», оснащенный гиперзвуковым прямоточным реактивным двигателем.

Полномасштабные наземные испытания двигателя запланированы на 2007–2008 гг., а уже в 2009 г. можно будет перейти к летным тестам всей системы. В отличие от современных

ракет, взлетающих вертикально за счет тяги двигателей, ракетоплан будет отрываться от земли как обычный самолет, используя при этом тягу двигателей и подъемную силу от крыльев и фюзеляжа, что обеспечит ему повышенные маневренность и безопасность. При аварийной ситуации аппарат может просто приземлиться на взлетную полосу. Для взлета и разгона до сверхзвуковой скорости будет использоваться обычный реактивный двигатель (скорость звука на уровне моря составляет 1200 км/ч), затем в работу включится прямоточный двигатель, который позволит развить скорость до значений 5–15 Маха (максимальное значение для прямоточных систем, М), а на финальном этапе сработает ракетный двигатель малой мощности. Разработками сверхзвукового летательного аппарата с прямоточным двигателем занимаются исследователи и инженеры многих стран мира. В этой статье мы остановимся на разработке энергетической системы для сверхзвукового летательного аппарата, проводимой Военно-воздушными силами, министерством обороны США и компанией *Pratt&Whitney Hypersonic Technology*. Исследованиями в данной области занимаются также Военно-морские силы США, NASA, специалисты из Австралии, Великобритании, Японии и других стран (табл. на стр. 42).

### Подготовка к полету

В 50-х гг. прошлого века были получены патенты на прямоточные двигатели, а спустя 10 лет стали проводиться наземные испытания при скоростях до 7,3 М. В качестве топлива разработчики использовали водород, который широко применялся при запуске космических аппаратов. В середине 1980-х гг. американское правительство одобрило программу по созданию космического корабля с прямоточным двигателем (*National Aerospace Plane Program*). В связи с окончанием «холодной войны» в 1994 г., после того как на исследование было потрачено \$2 млрд., проект закрыли. В 2004 г. NASA ▶

В скором времени может появиться новое поколение космических летательных аппаратов. Американские военные ведомства уже создали прототип такого двухступенчатого космического аппарата, способного доставлять в космос астронавтов и грузы. Будущее этого проекта во многом зависит от того, будут ли успешны испытания гиперзвукового прямоточного двигателя

закончила программу *Hyper-X*. Разработчикам удалось создать и протестировать два водородных прямоточных двигателя. В этом же году созданный американскими инженерами летательный аппарат X-43A в ходе испытаний достиг скорости 9,6 М (рис. на стр. 42).

Усилия специалистов Военно-воздушных сил США направлены на создание прямоточного двигателя, работающего на углеводородном топливе. Важным моментом в этих разработках является использова-

происходит сжатие воздуха, камера сгорания, где воздух высокого давления смешивается с топливом и сгорает, турбина, проходя через лопасти которой продукты сгорания создают вращающий момент для работы компрессора, и, наконец, сопло для получения реактивной тяги.

Современные реактивные двигатели могут разогнать летательный аппарат до 3 М (рис. на стр. 41). На больших скоростях происходит перегрев элементов конструкции двигателя. Когда скорость превы-

аппаратом скорости 5 М торможение воздушного потока приводит к интенсивному выделению энергии и нагреву двигателя, что и ограничивает скорость его движения.

### Гиперзвуковой прямоточный двигатель

Для получения большой мощности на высоких скоростях был создан прямоточный двигатель, в котором воздушный поток движется со сверхзвуковой скоростью. Как и в обычном двигателе, здесь отсутствуют вращающиеся элементы, такие как компрессор или турбина. Если представить схематично, то прямоточный двигатель представляет собой воронки, соединенные горлышками (рис. на стр. 41). В полете атмосферный воздух на сверхзвуковой скорости попадает в воздухозаборник (первая воронка) сжимается и нагревается, теряя скорость. Далее он попадает в центральную часть двигателя, смешивается с топливом и происходит процесс сгорания, температура этой смеси повышается. Далее высокотемпературный газ проходит через сопло (вторая воронка) и создает реактивную тягу.

Так же как акула, вынужденная без остановки плыть, чтобы в ее жабры попадала вода, наполняющая их кислородом, летательный аппарат с прямоточным двигателем должен двигаться вперед, засасывая в себя все новые и новые объемы воздуха. Прежде чем запустить прямоточный двигатель, ракетоплан надо разогнать с помощью ракетного или газотурбинного двигателя. Достигнув определенной скорости, пилот запускает прямоточный двигатель и поднимается в верхние слои атмосферы, а далее полет происходит за счет ракетной тяги. Использование на одном летательном аппарате нескольких двигателей — сложная техническая задача. Инженерам приходится учитывать вес полезной нагрузки, высоту орбиты, дальность и высоту полета в атмосфере и, исходя из этих факторов, создавать силовую установку для космического корабля. ▶

## Когда-нибудь воздушный корабль с гиперзвуковым прямоточным двигателем доставит пассажиров из Нью-Йорка до Сиднея за два часа

ние топлива для охлаждения элементов конструкции двигателя.

Прямоточный двигатель относится к группе реактивных конструкций, потребляющих кислород из атмосферы и обеспечивающих тягу при разных скоростях и высоте полета. Принцип их работы основан на сжатии атмосферного воздуха, смешивании его с топливом, сгорании этой смеси и выбросе продуктов сгорания через сопло для создания реактивной тяги. На пассажирских самолетах используется турбореактивный двигатель, состоящий из пяти основных элементов: воздухозаборник, компрессор, в котором

сжигает 2,5 М, двигателю не требуются компрессор и турбина, поскольку давление воздушного потока, попадающего в воздухозаборник, достаточно высоко. Поэтому основные элементы прямоточного двигателя — это воздухозаборник, камера сгорания и сопло (схема на стр. 41). Специальная конструкция воздухозаборника обеспечивает сжатие воздушного потока и уменьшение его скорости до дозвуковых значений. Топливо подается через форсунки в камеру сгорания. Далее поток ускоряется до звуковых скоростей и, попадая в сопло, разгоняется до сверхзвука. При достижении летательным

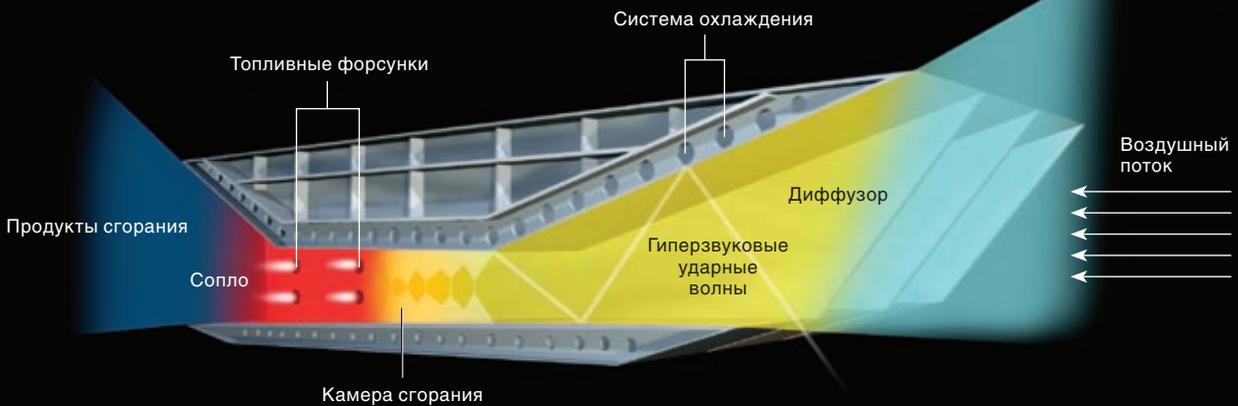
### ОБЗОР: ГИПЕРЗВУКОВОЙ ПРЯМОТОЧНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

- На базе гиперзвукового прямоточного двигателя уже в ближайшее время будет создано новое поколение летательных аппаратов. Это могут быть ракеты, космоланы и пассажирские воздушные суда, способные лететь со скоростью от 5 до 10 М (1 М — скорость звука, на уровне моря ее значение составляет 1200 км/ч).
- Атмосферный воздух со сверхзвуковой скоростью попадает в канал двигателя, смешивается с топливом и воспламеняется в камере сгорания, обеспечивая реактивную тягу двигателя. Для работы прямоточного двигателя (в отличие от ракетного) не требуется запас окислителя, поэтому мощность на единицу массы топлива возрастает в несколько раз.
- Несмотря на внешнюю простоту двигателя, в нем нет вращающихся агрегатов, таких как компрессор и турбина. Инженерам пока не удалось создать конструкцию, устойчиво работающую в разных полетных режимах.

## СЕМЕЙСТВО РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

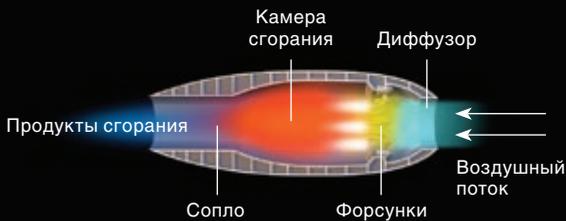
Гиперзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель относится к классу воздушно-реактивных двигателей. Физические основы процесса создания тяги в ВРД очень схожи. Атмосферный воздух попадает в диффузор двигателя, сжимается, смешивается с топливом, попадает в камеру сгорания и, проходя через сопло, создает реактивную тягу

### ГИПЕРЗВУКОВОЙ ПРЯМОТОЧНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ (4,5–15 М)



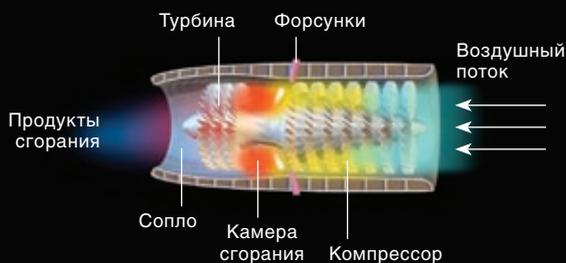
Гиперзвуковой воздушный поток попадает в диффузор, где он замедляется, и происходит повышение давления. Часть кинетической энергии переходит в тепловую. В камере сгорания гиперзвуковой воздушный поток смешивается с топливом, начинается процесс сгорания смеси, где химическая энергия топлива переходит в тепловую. Далее происходит повышение температуры и давления продуктов сгорания

### ПРЯМОТОЧНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ (2,5–6 М)



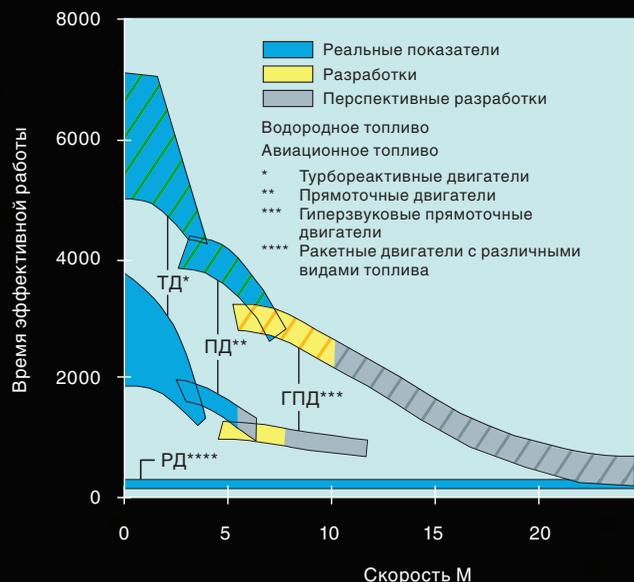
Отличие в режимах работы обычного и гиперзвукового прямоточного двигателя заключается в том, что в первом поток имеет дозвуковую, а во втором сверхзвуковую скорость

### ТУРБОРЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ 0–3 М



Низкая скорость воздушного потока приводит к тому, что для работы двигателя требуется компрессор, повышающий давление воздуха в рабочем канале двигателя

### ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ



Силовой агрегат летательного аппарата должен полностью соответствовать его полетным условиям. Водородное топливо при высокой энергетической отдаче по сравнению с углеводородным требует более сложной конструкции топливных баков и наземной инфраструктуры. Эффективность топлива можно оценить как отношение тяги двигателя к весу летательного аппарата

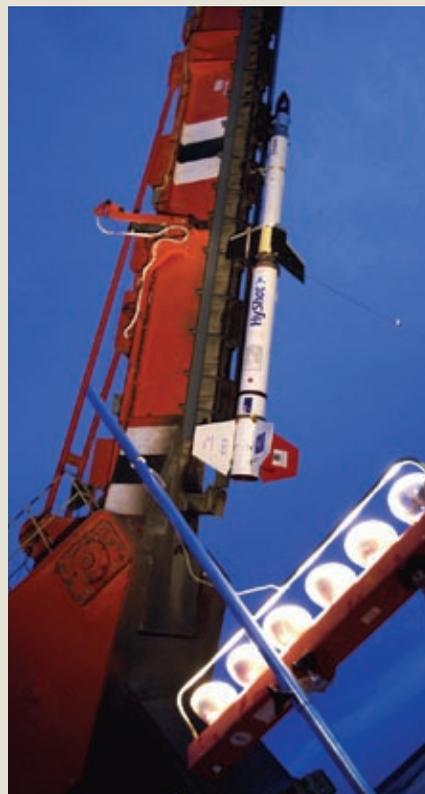
## ОСНОВНЫЕ РАЗРАБОТКИ

Наряду с американскими *HyTech* и *X-51A*, некоторые национальные и международные компании занимаются совершенствованием конструкции прямоточного двигателя

Программа	Сроки	Исполнитель	Цели
<i>Hyper-X</i>	1996–2004 гг.	NASA	Создание малого экспериментального летательного аппарата с прямоточным двигателем, работающим на водороде. В ходе полетных испытаний <i>X-43A</i> достиг скорости 10 М
<i>HyShot</i>	С 2001 г. по настоящее время	Квинлендский университет, Австралия, при поддержке специалистов из Великобритании, США, Германии, Южной Кореи и Японии	В 2002 г. впервые прошел успешные летные испытания гиперзвуковой прямоточный двигатель. Летательный аппарат, развивший скорость 7,6 М, продержался в воздухе на предельной скорости 6 секунд.
<i>Hypersonic Flight Demonstration HyFly</i>	С 2002 г. по настоящее время	Управление перспективных исследований министерства обороны США ( <i>DARPA</i> ) и Управление исследований ВМС США ( <i>ONR</i> )	В рамках программы предполагается создать крылатую ракету с прямоточным двигателем, способную развить скорость 6 М. Лаборатория физики Университета Джона Хопкинса разработала ракетный двигатель для вывода аппарата на стартовый режим
<i>Freeflight Atmospheric Scramjet Test Technique</i>	С 2003 г. по настоящее время	<i>Alliant Techsystems</i> , при поддержке <i>DPRPA</i> и <i>ONR</i>	Аппарат с ракетным стартом, используя керосин в качестве топлива, на протяжении 15 сек. развивал скорость 5,5 М
<i>Falcon</i>	С 2003 г. по настоящее время	<i>DARPA</i>	В рамках программы предполагается создать военный беспилотный самолет, способный достигать любой точки планеты за два часа. Такой летательный аппарат может использоваться и в гражданских целях



Летательные аппараты с гиперзвуковым прямоточным двигателем могут быть различными по компоновке, но их объединяет наличие ускорителя, который обеспечит режим запуска. Созданный в рамках программы NASA летательный аппарат *X-43A* был выведен на стартовый режим экспериментальной ракетой *Pegasus*. В ноябре 2004 г. этот аппарат достиг скорости 9,6 М (вверху). Для запуска еще двух экспериментальных аппаратов, *HyShot* (справа) и *FASTT* (в центре), была выбрана ракета *Terrier-Orion*



Основной проблемой для разработчиков прямооточного двигателя стала высокая скорость воздушного потока в камере сгорания и поддержание процесса горения. Тягой двигателя можно управлять, изменяя объем попадающего в него воздуха и контролируя расход топлива. Современные системы контроля и управления процессом горения позволяют отказаться от механических дроссельных заслонок для изменения тяги двигателя.

Инженеры, участвующие в создании гиперзвукового прямооточного двигателя, знают, что сложнее всего

теплоносителя создает дополнительные трудности для разработчиков, т.к. повышение его температуры может привести к расщеплению и образованию газовых пробок в системе охлаждения. Еще один недостаток такой системы — увеличение общего веса.

Управлять тягой прямооточного двигателя достаточно сложно, поскольку неизменная геометрия внутреннего объема обеспечивает его оптимальную работу в узком диапазоне скоростей и высот. К сожалению, современные материалы и технологии ограничивают возможность

высотного самолета SR-71 «Черный дрозд», где система охлаждения двигателя использует топливо в качестве теплоносителя. Для термического баланса системы количество топлива, используемого для охлаждения, не должно превышать его расход в камере сгорания. Разработчики задали такие параметры, при которых этот оптимальный режим наступает при скорости 5 М, и топливо JP-7 вполне справляется с задачами.

Чтобы соперничать с ракетным двигателем, прямооточная конструкция должна демонстрировать устойчивую работу на скоростях в два раза меньше максимальных. На скорости 4 М воздушный поток в двигателе имеет низкую температуру и при его смешивании с топливом не возгорается. Решить проблему можно за счет химической добавки, которая понизит порог воспламенения, или подачи через инжекторы в камеру сгорания высокотемпературного газа. Чем больше скорость полета, тем сложнее поддерживать процесс сгорания.

Первый этап программы *HuTech* завершился в 2003 г. После проведения наземных испытаний у исследователей появилось много вопросов. В первую очередь, это касается переходных режимов при изменении скорости, давления и работы дроссельных систем. Даже самая хорошая аэродинамическая труба не в состоянии обеспечить все режимы, поэтому последнее слово остается за летными испытаниями. Специально для этих целей был создан экспериментальный ▶

## ОБ АВТОРЕ

**Томас Джексон** (Thomas Jackson) работает в отделе аэрокосмических двигателей научно-исследовательской лаборатории министерства ВВС США в шт. Огайо, в Калифорнийском университете и в Массачусетском технологическом институте. Основная область научных интересов — исследование процесса подачи и сгорания топлива

## Сжигание топлива в гиперзвуковом прямооточном двигателе похоже на попытку поддерживать горение спички в эпицентре урагана

контролировать создающуюся в нем энергию, основные источники которой — замедляющийся сверхзвуковой воздушный поток и энергия от сгорания топлива. В отдельных элементах конструкции двигателя могут образовываться локальные выбросы тепловой энергии за счет воздействия на них сверхзвуковой ударной волны. Если перевести всю кинетическую энергию сверхзвукового потока, проходящего через двигатель, в тепловую, то ее будет достаточно, чтобы он расплавился. Таким образом, для поддержания процесса сгорания топлива следует изменить скорость движения, температуру и давление воздушного потока.

В двигателях такого типа используется активная система охлаждения. Через специальные теплообменники насосами прокачивается топливо, которое играет роль теплоносителя, и излишки тепловой энергии, способной разрушить элементы конструкции, идут на подогрев топлива. Такая технология широко используется в ракетной технике уже давно, с той лишь разницей, что в качестве теплоносителя выступает жидкий кислород. Использование углеводородного топлива в качестве

создания двигателя с изменяющимися параметрами воздушного потока в его внутреннем объеме. Поэтому ограничивается эффективность работы подобных систем.

### Предмет изучения

Несмотря на технические проблемы, появившиеся во время работы под конструкцией прямооточного двигателя, специалисты добились определенных успехов. К числу таких достижений можно отнести результаты, достигнутые в рамках программы *HuTech*, начатой Военно-воздушными силами США в 1995 г. Исследователи и инженеры поставили перед собой задачу создать одноразовый прямооточный двигатель малой мощности и установить его на ракете. Он лучше всего подходит для проведения комплекса наземных испытаний, а в дальнейшем его можно будет усовершенствовать. Для упрощения задачи было принято решение ограничить скоростной режим пределами 4–8 М и сохранить неизменной внутреннюю геометрию воздушного потока.

В качестве топлива использовалось углеводородное соединение JP-7, разработанное специально для



Экспериментальный гиперзвуковой летательный аппарат X-51A пройдет летные испытания в 2009 г. (вверху). Созданный по заказу министерства ВВС США прототип гиперзвукового прямоточного двигателя прошел испытания в аэродинамической трубе на базе NASA в Лэнгли (справа)

летательный аппарат X-51A, полеты которого должны начаться в 2009 г. (рис. вверху).

Поскольку технически невозможно создать двигатель с внутренней геометрией воздушного потока, изменяющейся в зависимости от скорости и высоты полета, разработчики выбрали конструкцию, способную работать эффективно в диапазоне скоростей от 4,5 до 7 М. В такой схеме подача топлива в систему охлаждения и камеру сгорания стала основным параметром, определяющим режим работы двигателя.

В качестве основного конструктивного материала выбрана сталь, а энергетически напряженные узлы охлаждаются за счет прокачки топлива. Те элементы конструкции, на которые приходится большие термические нагрузки, выполнены из керамики. Такие элементы создают дополнительные проблемы, т.к. коэффициент термического расширения у данных материалов сильно отличается, что может повлиять на геометрию воздушного потока. Инженеры справились с задачей, создав особую конструкцию соединения керамических элементов.

Использование топлива JP-7 в качестве источника энергии и теплоносителя оказалось удачным решением. До этого разработчики отдавали предпочтение жидкому кислороду, по сравнению с которым углеводо-

родное топливо имеет более низкие энергетические показатели на единицу массы и не подходит в качестве теплоносителя. В то же время последнее широко используется в военной авиации, и под него создана инфраструктура. Учитывая, что плотность углеводородов выше, чем у кислорода на единицу объема, из этого топлива можно получить больше энергии и тем самым уменьшить размеры топливных баков.

Для того чтобы повысить энергетические характеристики топлива JP-7, пришлось поработать команде химиков. При нагревании JP-7 без доступа кислорода и при наличии катализатора, тяжелые углеводороды распадаются на легкие фракции. Присутствие катализатора позволяет высвободить в пять раз больше энергии по сравнению с обычным процессом нагрева. В итоге происходит переход топлива в газообразное состояние, и его энергетический потенциал возрастает на 10%. Легкие фракции, полученные за счет нагрева, обеспечивают устойчивое сгорание даже при малом времени нахождения в камере сгорания.

Ученым удалось создать прямоточный двигатель, способный разогнать экспериментальный летательный аппарат до скорости 4,5–7 М. Они также разработали систему охлаждения и композитные элементы конструкции, позволяющие

обеспечить работу двигателя до тех пор, пока не закончится топливо. В 2009 г. первая ступень с ракетной конструкцией должна разогнать экспериментальный X-51A до скорости запуска гиперзвукового прямоточного двигателя.

### Что впереди?

Даже если летные испытания пройдут успешно, то до того момента, когда будет создан летательный аппарат, способный нести оружие, совершать гиперзвуковые межконтинентальные перелеты или выходить в космос, предстоит еще многое сделать.

Основной задачей остается обеспечение устойчивой работы двигателя в широком диапазоне скоростей. Реактивные двигатели экономичны при скоростях до 4 М, а для полета ракеты это значение должно достигать 15 М. На таких предельных скоростях термические нагрузки на элементы конструкции от замедляющегося воздушного потока растут катастрофически. Создать силовую установку, объединяющую прямоточный и турбореактивный двигатели, возможно, но следует учитывать соотношение веса и тяги каждого агрегата.

Ракетоплан X-51A с гиперзвуковым двигателем с фиксированной геометрией канала не может летать на скорости меньше 4 М.

Американские инженеры уже создали прототип гиперзвукового прямоточного двигателя с изменяющейся геометрией аэродинамического потока.

Совершенствование системы подачи топлива может оказать существенное влияние на полетные режимы X-51A. Доступные технологии позволяют использовать углеводородное топливо JP-7 после его подогрева и перехода в газообразное состояние. При низких скоростях полета потребуется топливо в жидкой фазе или смесь газа и жидкости. Плотность жидкости в 1 тыс. раз больше, чем плотность газа, и именно данное обстоятельство осложняет процесс устойчивой работы двигателя. Отдельные компоненты таких технологий были опробованы на испытательных стендах. В результате была доказана возможность использования топлива JP-7 при скорости 8 М. Полеты на более высоких

скоростях потребуют иного топлива и новых конструкционных материалов (возможно, даже будет использован водород, что создаст много проблем для конструкторов летательного аппарата).

Основной задачей программы *HuTech* стало создание аппарата, взлетающего как обычный самолет и имеющего габариты ракеты. Для межконтинентальных и космических перелетов потребуются большие масштабы. Поэтому в 2003 г. было решено приступить к проекту летательного аппарата, в сто раз превосходящего по размерам разработку *HuTech*.

Новые исследования позволяют существенно увеличить скорость полета гражданских и военных летательных аппаратов и реализовать фантазии человечества об освоении космического пространства. О российских разработках — статья «Двигатель будущего» на стр. 77. ■

**ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

- Ramjets. Edited by Gordon L. Dugger. American Institute of Aeronautics and Astronautics Selected Reprint Series, 1969.
- A Procedure for Optimizing the Design of Scramjet Engines. P.J. Waltrup, F.S. Billig and R.D. Stockbridge in Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 16, No. 3, pages 163–171; May–June 1979.
- Research on Supersonic Combustion. F.S. Billig in Journal of Propulsion and Power, Vol. 9, No. 4, pages 499–514; July–August 1993.
- Hypersonic Airbreathing Propulsion. William H. Heiser, David T. Pratt, Daniel H. Daley and Unmeel B. Mehta. American Institute of Aeronautics and Astronautics Education Series, 1994.
- Investigation of Scramjet Injection Strategies for High Mach Number Flows. D.W. Riggins, C.R. McClinton, R.C. Rogers and R.D. Bittner in Journal of Propulsion and Power, Vol. 11, No. 3, pages 409–418; May–June 1995.

**Автор и ведущий С. П. Капица**

**Новая теория происхождения и строения Вселенной**  
 Гость: А.Д. Лице, профессор физики Стэнфордского университета  
 Программа посвящена новой космологической теории. Невероятно, но то, что мы привыкли считать бесконечной Вселенной, лишь малая ее часть. Приблизительно Вселенная, подобная нашей, возникает каждые 10 миллиардов лет. Возможно, что в далеком будущем наши потомки сами научатся создавать Вселенные, пригодные для жизни.

**Туннели в параллельные миры**  
 Гость: Н.С. Кардашев, академик РАН, директор Центра астрокосмического центра ФИАН  
 Кого из нас не волновал вопрос: есть ли у нас во Вселенной соседи по разуму? Конечно, что уже в самом недалеком будущем ученые смогут с определенностью ответить на этот вопрос и даже получить сигналы от представителей незнакомых цивилизаций. Невероятно, но значительная часть объектов, именуемых черными дырами, на самом деле являются... туннелями в иные миры, и уже сегодня создаются сверхмощные телескопы, способные заглянуть на себя роль космических порталов.

**Новейшие данные об исследованиях Марса**  
 Гость: Н.Г. Митрофанов, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории генома системоскопии Института космических исследований РАН  
 Возможны ли в недалеком будущем пилотируемые полеты на Марс? Станут ли наши соотечественники первыми посетителями красной планеты? Почему орудит этой теме продолжают возникать новые и новые мифы, и что происходит на самом деле? Обзор новейшей информации об исследованиях красной планеты.

**Механизмы человеческой памяти глазами нейробиолога**  
 Гость: К.В. Алохин, доктор медицинских наук, член корреспондент РАМН, руководитель отдела системологии Института нормальной физиологии им. П. Алохина  
 Как устроена наша память? Еще недавно в ответе на этот вопрос можно было опираться только на наблюдения за типичным поведением человека. Последние открытия нейробиологии дают возможность исследовать не только у человека, но и в лабораторных условиях, но и в лабораторных условиях, но и в лабораторных условиях. Как сделать нашу память совершенной, не нанеся ущерба личности?

**ВЫПУСК 3**

**очевидное – невероятное**



**очевидное**  
телепрограмма  
**невероятное**

**ВЫПУСК 3**

**Тема:** Новая теория происхождения и строения Вселенной  
**Тема:** Туннели в параллельные миры  
**Тема:** Новейшие данные об исследованиях Марса  
**Тема:** Механизмы человеческой памяти глазами нейробиолога



4607069473064

© ИОО "Телекомпания "Очевидное-Невероятное"  
 125080, Москва, ул. Мясницкая, д. 20  
 Тел.: (495) 251-11-88  
 Факс: (495) 251-11-89  
 E-mail: info@ochvidnoe.ru  
 125080, Москва, Мясницкая ул., д. 20  
 Тел.: (495) 251-11-88  
 Факс: (495) 251-11-89  
 E-mail: info@ochvidnoe.ru

Послать письмо 64 стр.  
 Адрес: 125080, Москва, ул. Мясницкая, д. 20  
 Тел.: (495) 251-11-88  
 Факс: (495) 251-11-89  
 E-mail: info@ochvidnoe.ru

**сейприс**

**VHS PAL**



Марк Герштейн и Дэю Чжэн

# ПОДЛИННАЯ ЖИЗНЬ ПСЕВДОГЕНОВ

Поврежденным  
генам,  
разбросанным  
по всему геному  
человека, есть что  
рассказать, но пока  
их истории остаются  
неуслышанными

У каждой семьи есть свой скелет в шкафу. Нечто подобное есть и в организме любого человека, но «скелетов» в нем множество, и называются они псевдогенами — останками умерших генов. Их изучение (как и исследование ископаемых останков живых существ) проливает свет на эволюцию ныне живущих привычных для нас форм, и свидетельствует о том, что некоторые из этих «генетических динозавров» скорее живы, чем мертвы.

Совершенно очевидно, что наш геном служит не просто хранилищем информации, а представляет собой активно действующую компьютерную операционную систему. Псевдогены можно рассматривать как хранителей древнего кода, свода правил, по которым жила исчезнувшая «цивилизация», но они также составляют встроенное в общую генетическую программу живого организма послание, повествующее об их долгой жизни. Будучи продуктами процессов перестройки и адаптации генома к современным условиям, псевдогены позволяют

по-новому взглянуть на его динамику, а их изучение проливает свет на возможную роль этих рудиментов в функционировании нашего генома не только в прошлом, но, возможно, и в настоящем.

## Откуда берутся псевдогены?

«Фальшивые» гены, похожие на настоящие, но не выполняющие никаких известных функций, впервые были обнаружены и названы псевдогенами в конце 1970-х гг., когда начались поиски хромосомных областей, детерминирующих синтез целевых белковых молекул. Так, при идентификации гена, ответственного за выработку  $\beta$ -глобина, одного из ключевых компонентов кислородпереносащего белка гемоглобина, был обнаружен сегмент ДНК, сходный с глобиновым геном, но не кодирующий никакого белка. Его важные функциональные части подверглись мутационным изменениям, и в результате трансляция оказалась невозможной.

Недавно, после того как были секвенированы геномы человека и других организмов, биологи смогли ►

взглянуть на генетический ландшафт «с высоты птичьего полета» и с удивлением обнаружили на нем много странных объектов. Геном человека состоит из трех с лишним миллиардов пар нуклеотидов — «строительных блоков» молекул ДНК, — и всего 2% из них входят в состав генов, сегментов, кодирующих белки. Примерно треть геномной ДНК — это интроны, некодирующие части в самих генах, а оставшаяся часть — межгенные участки, «темная материя», чья функция пока неизвестна. Именно на таких бескрайних просторах и разбросано в беспорядке большинство псевдогенов.

Наша исследовательская группа совместно с коллегами из Европы и Японии идентифицировала более 19 тыс. псевдогенов. Настоящих генов в геноме человека примерно 21 тыс., и, вероятно, в недалеком будущем число обнаруженных псевдогенов превысит число их функциональных партнеров. Как появились псевдогены? Почему их так много? По какой причине они остаются в геноме, если от них нет никакой пользы?

Ответ на первый вопрос известен. Скорее всего, небольшая часть псевдогенов когда-то была полноценными генами, которые умерли вследствие катастрофических изменений в их нуклеотидной последовательности. Но основную массу псевдогенов составляют нефункциональные дубликаты работающих генов. Возможно, они такими и родились вследствие серьезных ошибок в процессе копирования, а быть может, со временем накопили большое число мутаций и стали неработоспособными.

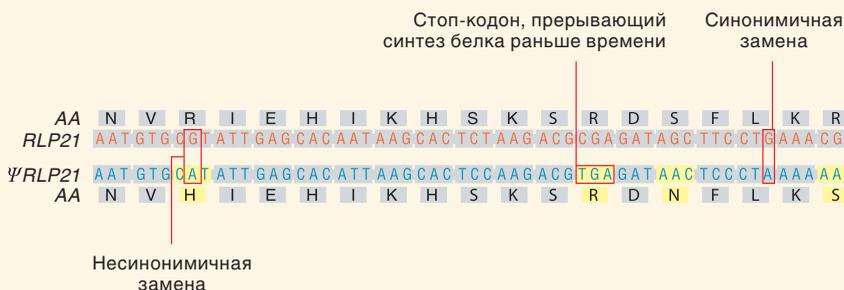
### ОБЗОР: ПСЕВДОГЕНОМ

- Псевдогены — это молекулярные «руины» генов, не способные функционировать вследствие утраты или повреждения жизненно важных элементов.
- Большинство псевдогенов представлено неточными копиями нормальных генов. По таким генетическим останкам можно судить о динамике генома и эволюции генов.
- Идентификация псевдогенов требует локализации сегментов, сходных с нормальными генами, а затем проверки их на функциональность.

Дупликация генов может осуществляться двумя путями, однако в обоих случаях это приводит к разрастанию генома и появлению разных вариантов одного и того же гена. Если во время копирования гена происходит ошибка, сопровождающаяся утратой функции, то ген перестает существовать как таковой и превращается в псевдоген (справа). Мутации, приводящие к гибели гена, могут быть самыми разными (внизу): от обширной делеции (утрата промотора) до небольшого изменения нуклеотидной последовательности, приводящего к изменению смысла белок-кодирующих областей генома (экзонов)

#### СМЕРТЬ ГЕНА

Ген становится псевдогеном, когда при его копировании возникают ошибки, несовместимые с жизнью, или же если со временем в нем накапливаются мутации, и ген перестает выполнять свои функции. Клеточный аппарат трансляции считывает генетический текст, записанный с помощью четырех букв, азотистых оснований (A, T, G и C), не побуквенно, а триплетами. Каждый триплет, называемый кодоном, соответствует аминокислоте или так называемому знаку препинания (существует старт-кодон, указывающий начало текста, и стоп-кодон, указывающий его окончание). Замена в кодоне всего одного нуклеотида может привести к изменению его смысла (он будет кодировать другую аминокислоту), а вставка или делеция — к изменению смысла всех последующих кодонов (мутации со сдвигом рамки считывания). Внизу приведены нуклеотидные последовательности сегментов одного из генов человека (*RLP21*) и его псевдогена (*ψRLP21*), обе начинающиеся с 21-кодона. Указаны некоторые мутации, приводящие к утрате геном его функции и образованию псевдогенов



Необходимым условием правильного функционирования любого гена является сохранение его структуры, прежде всего, наличие полноразмерного экзона (участка, кодирующего определенный белок), не прерываемого интронами (некодирующими сегментами). Еще один обязательный элемент — так называемый промотор, находящийся непосредственно перед геном и служащий «опознавательным знаком» для клеточного аппарата транскрипции, который должен вначале определить положение гена на хромосоме, а потом его копировать. Перед

экспрессией гена с промотором связываются особые белковые молекулы. Перемещаясь вдоль гена, они синтезируют на нем молекулу РНК, так называемый первичный транскрипт. Последний подвергается сплайсингу, из него вырезаются интроны. Оставшиеся экзоны сшиваются друг с другом, и в результате образуется матричная РНК (мРНК). Затем информация, записанная в мРНК на языке нуклеотидов, переводится на рибосоме на язык аминокислот, из которых состоят белки. Синтезированный на данной мРНК белок выполняет функции, определяемые геном, кодирующим белок.

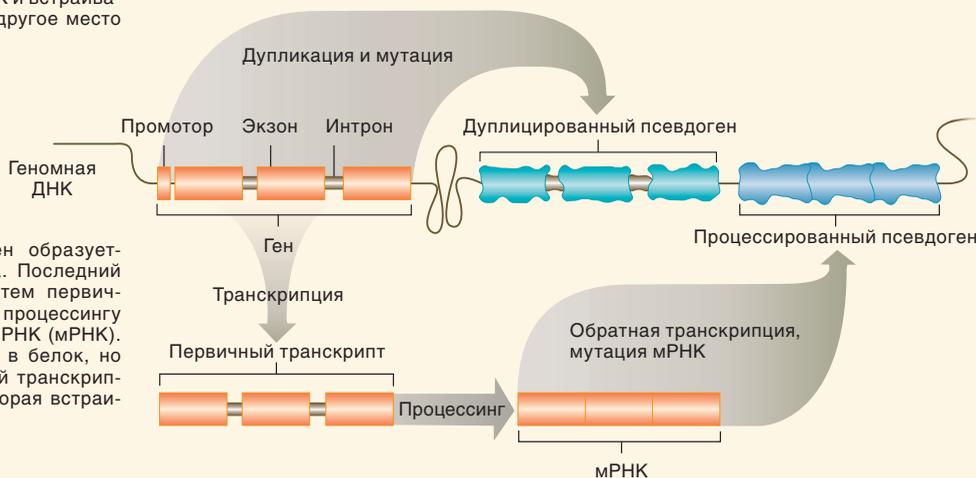
Псевдогены образуются двумя способами, и каждый из них приводит к появлению своей копии исходного гена. Непосредственно перед делением клетка удваивает свой геном, и в ходе данного процесса лишняя копия какого-нибудь гена может включиться в другую хромосомную область. Новая версия гена способна появиться и в результате обратной

**ДЕФЕКТНЫЕ КОПИИ**

Дуплицированный псевдоген образуется при дупликации клеточной ДНК и встраивании дополнительной копии в другое место генома

Процессированный псевдоген образуется во время экспрессии гена. Последний транскрибируется в РНК, затем первичный транскрипт подвергается процессингу и превращается в матричную РНК (мРНК). Обычно мРНК транслируется в белок, но иногда подвергается обратной транскрипции с образованием ДНК, которая встраивается в геном

**РОЖДЕНИЕ ПСЕВДОГЕНА И СМЕРТЬ ГЕНА**



Крупная делеция



Делеция со сдвигом рамки

Вставка со сдвигом рамки

транскрипции: в ходе экспрессии гена мРНК транскрибируется в ДНК, которая встраивается в геном. Такой процесс называется ретротранспозицией, и в нем участвует мобильный генетический элемент *LINE* (*long interspersed nuclear element*), по своей структуре, особенностям транскрипции и механизму транспозиции напоминающий ретровирусные провирусы. У него есть аппарат получения своих ДНК-копий для последующего встраивания их в геном, а если во время работы *LINE* поблизости оказываются какие-либо мРНК, то заодно копируются и они, а их ДНК-копии подвергаются ретротранспозиции.

Дупликация и ретротранспозиция служат основными механизмами ремоделирования геномов в ходе эволюции, увеличения генома и его диверсификации, появления новых разновидностей организмов. Но если копия гена содержит «опечатки» или у него отсутствует какой-то важный элемент, например, промотор, то он

становится псевдогеном. Те из них, что появились в результате дупликации всего гена, содержат как экзоны, так и интроны. В отличие от них, псевдогены, образовавшиеся в результате обратной транскрипции, не содержат интронов и называются процессированными псевдогенами.

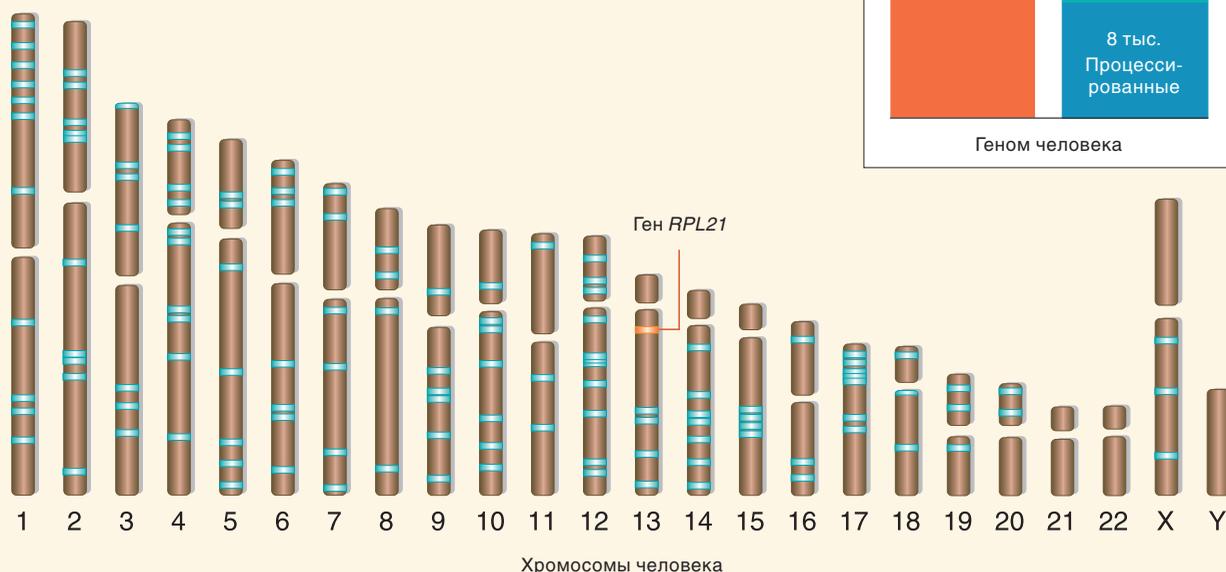
На первый взгляд распределение большинства псевдогенов в геноме человека представляется случайным, но в действительности отдельные гены дают начало псевдогенам чаще других. Молекулярные биологи объединяют функциональные гены в семейства, основываясь на сходстве их нуклеотидных последовательностей и назначения. Всего около четверти таких групп связаны с псевдогенами, а некоторые из них производят необычайно большое число копий. Например, семейство из 80 генов человека, детерминирующих синтез рибосомных белков, породило примерно 2 тыс. процессированных псевдогенов, что составляет

10% суммарного числа идентифицированных псевдогенов во всем геноме. А ген одного из рибосомных белков, *RPL21*, имеет более 140 псевдогенных «дубликатов».

Такое различие между генами связано с разным уровнем активности. Те, что отвечают за основные жизненные функции клетки (так называемые «гены домашнего хозяйства»), отличаются высоким уровнем экспрессии, и шансы появления их неполноценных копий выше (к ним относятся упомянутые гены, детерминирующие синтез рибосомных белков).

Поскольку псевдогены образуются в нашем геноме с незапамятных времен, некоторые из них представляют собой остатки генов, элиминированных в ходе эволюции и никакого функционального аналога в геноме не имеют. Другие служат копиями генов, столь сильно изменившихся в ходе эволюции, что нуклеотидная последовательность псевдогенов сходна с таковой их древних ▶

ПОТОМКИ ПСЕВДОГЕНА (синий цвет) гена рибосомного белка *RPL21* (оранжевый цвет) рассеяны по всем хромосомам человека. Распределение псевдогенов по геному на первый взгляд кажется совершенно случайным, однако в действительности некоторые области генома заселены ими более плотно. Идентификация генов и псевдогенов не закончена. На сегодняшний день в геноме человека выявлено более 19 тыс. псевдогенов, т.е. немного меньше числа нормальных генов (21 тыс.). Примерно 8 тыс. наших псевдогенов процессированы, остальные представлены дублированными копиями и другими непроцессированными генетическими элементами



предков. Таким образом, межгенные области можно рассматривать как объемную летопись, «преданья старины глубокой».

### Семейные истории

Число и тип мутаций, возникающих в функциональных генах, строго ограничивается естественным отбором. Если вместе с мутацией организм получает некое преимущество, то мутантный ген закрепляется в популяции. Если же мутация приводит к нарушению функции

гена, то он под давлением отбора устраняется.

Еще недавно псевдогены считали негодным генетическим хламом. Однако, лишенные контроля со стороны естественного отбора, они могут накапливать любые мутации, в том числе и полезные для своих нормальных партнеров. Основываясь на изменении во времени нуклеотидных последовательностей псевдогенов, можно создать молекулярные часы и использовать их для изучения эволюции генома. Такой подход поможет молекулярным биологам проникнуть в тайну рождения и смерти генов, точно так же как ископаемые останки животных помогают палеонтологам проследить появление, эволюцию и вымирание разных видов живых существ.

Наша группа исследовала на предмет наличия псевдогенов геномы многих форм жизни: от бактерий до таких сложных организмов, как дрожжи, черви, мухи и мыши. Изобилие осколков генов поражает, при

этом их число у разных видов варьирует гораздо больше, чем число нормальных генов, и не коррелирует ни с числом последних, ни с размером геномов. Однако сравнительный анализ псевдогенов в сходных геномах может дать важную информацию об истории специфических генов и ходе молекулярной эволюции.

Одно из самых многочисленных генных семейств у млекопитающих состоит более чем из 1 тыс. различных генов, кодирующих белки обонятельных рецепторов (ОР). Детальный анализ таких генов и их псевдогенов, проведенный Дореном Лансетом (Doron Lancet) и Йовом Гиладом (Yoav Gilad) из Вейцмановского института в Реховоте (Израиль), показал, что значительная их часть стала нефункциональной, и теперь их не более 500. Однако у мышей и крыс до 300 аналогов человеческих псевдогенов белков обонятельных рецепторов остались в рабочем состоянии.

Для выживания человека обоняние в значительной мере утратило

### ОБ АВТОРАХ

**Марк Герштейн** (Mark Gerstein) и **Дэю Чжэн** (Deyou Zheng) специализируются в области биоинформатики. Герштейн — профессор информатики Йельского университета и один из руководителей Проекта по вычислительной биологии и биоинформатике. Чжэн занимается исследованием роли псевдогенов и их эволюции, а также анализом межгенных областей ДНК.

свою значимость, чего нельзя сказать о грызунах. У человека гораздо больше псевдогенов этого семейства, чем у шимпанзе, т.е. со времени расхождения человека и приматов мы избавились от множества функциональных генов данного типа. У приматов, в свою очередь, больше псев-

Часто гены, отвечающие за адаптацию организма к изменившимся условиям, подвергаются интенсивной дупликации и последующей диверсификации, образуя обширные семейства. Нередко в результате появляются псевдогены, но чаще они образуются при нарушении

человека имеют «партнеров» в геноме грызуна. Более того, некоторые генные семейства, сходные у человека и мыши, дали начало семействам псевдогенов. Существенно различается и «возраст» псевдогенов, установленный благодаря частоте изменения нуклеотидных последовательностей, что говорит о том, что многие псевдогены у человека и мыши появились в разное время. Это свидетельствует о том, что импульсом к ретротранспозиции, следствием которой стало появление псевдогенов, у этих двух линий послужили совершенно разные события.

## Число и распределение псевдогенов в геноме разных организмов отражает особенности их эволюции

догенов упомянутого семейства (от 30 до 40% суммарного числа), чем у грызунов и собак, что указывает на меньшую значимость обоняния для них по сравнению с мышами и собаками.

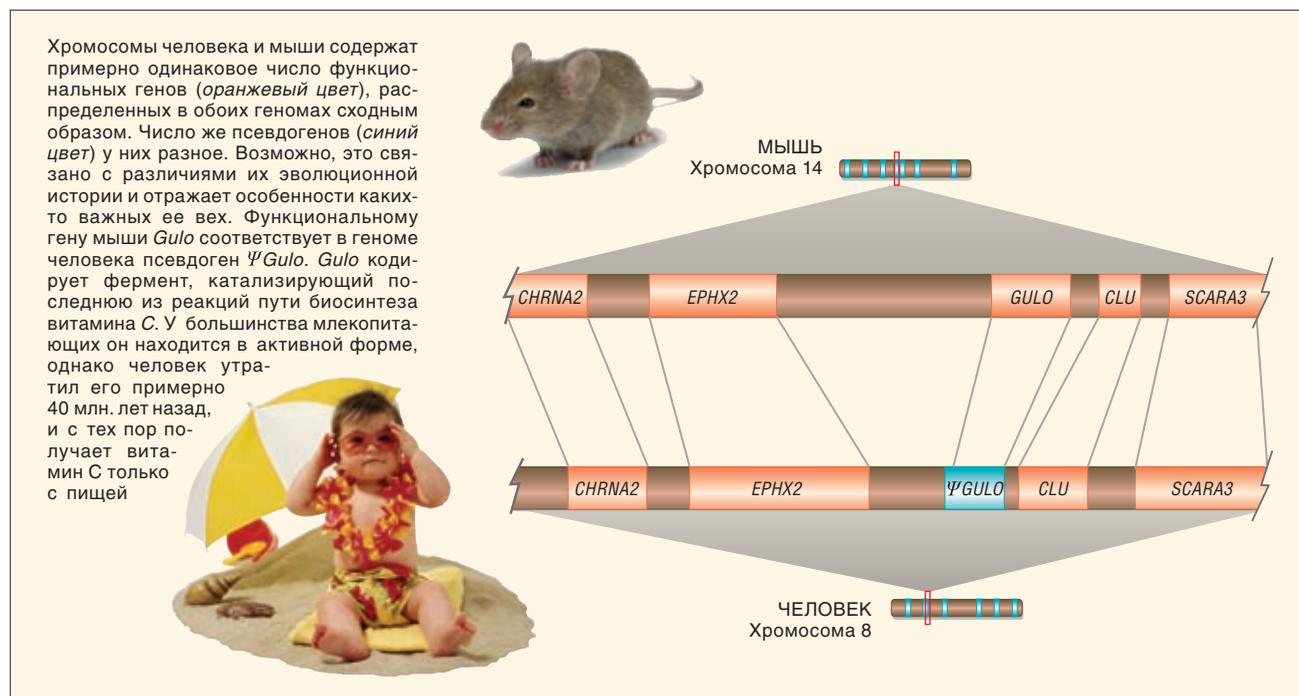
По данным Лансета, проанализировавшего геномы различных приматов, больше всего ОР-генов утрачено (и тем самым больше всего ОР-псевдогенов приобретено) у человекообразных обезьян. В ходе эволюции они научились различать свет трех длин волн, и значимость зрения для них превысила значимость обоняния, таким образом, часть соответствующих генов просто перестала функционировать.

я в дополнительных копиях генов, связанных с изменениями окружающей среды или самого организма. Различия в числе и характере псевдогенов у разных животных обуславливаются поворотами их эволюционной истории, которые при сравнительном анализе полноценных генов (чья изменчивость строго ограничена) выявить не просто.

После секвенирования генома человека выяснилось, что у 99% его генов имеются аналоги в геноме мыши, несмотря на то, что эти виды разошлись очень давно — 75 млн. лет назад. В отличие от функциональных генов, лишь небольшая часть выявленных на сегодня псевдогенов

### Сканирование и анализ

Идентификация псевдогенов оказалась сложной задачей. Для поиска функциональных генов используются специальные алгоритмы, основанные на том, что ген должен обладать определенным набором элементов. При распознавании псевдогенов применяются другие принципы, прежде всего, их сходство со специфическими генами и отсутствие активности. Компьютер может выявить такое сходство, сопоставив интересующий исследователей сегмент ДНК из межгенной области со всеми возможными ▶



генами. Протестировать предполагаемый псевдоген на отсутствие у него активности гораздо труднее.

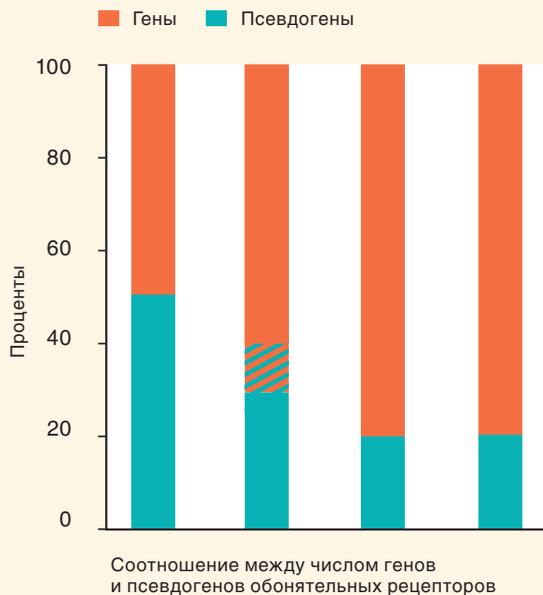
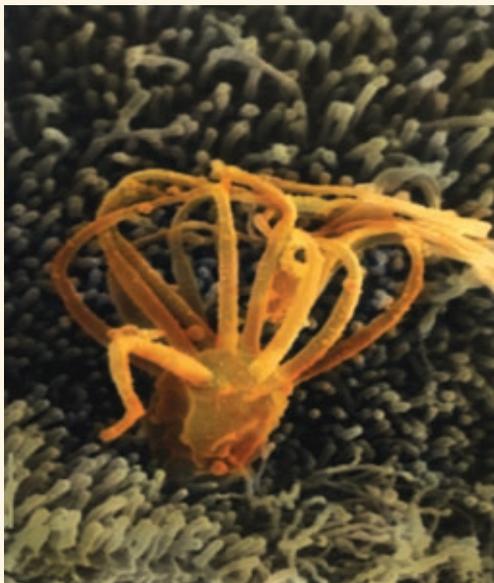
Функционирующий ген способен утратить активность и превратиться в псевдоген по разным причинам. К этому могут привести такие мутации, как появление в нуклеотидной последовательности стоп-кодона в неположенном месте, вставки или делеции, сдвигающие рамку считывания, и т.д. Подобные нарушения несовместимы с жизнью гена и служат маркерами псевдогенов. Существуют и менее значительные нарушения, затрагивающие всего один нуклеотид. Подобные мутации можно разделить на две категории: одни изменяют смысл содержащего их кодона и, следовательно, сохраняют аминокислотную последовательность белка, кодируемого данным геном, другие приводят к противоположным последствиям. Такие однонуклеотидные замены называются соответственно синонимичными и несинонимичными. Поскольку модификация аминокислотной последовательности белка может

привести к изменению его функции, ген, испытывающий давление естественного отбора, будет содержать предпочтительно синонимичные замены, а нефункциональный ген — любые другие.

Сравнение профилей псевдогенов для разных геномов выявило, что небольшое число псевдогенов более консервативно, чем следовало ожидать, если бы изменения их нуклеотидной последовательности не отражались на их судьбе. Значит, такие псевдогены все-таки испытывают давление отбора, а, следовательно, выполняют определенные функции. Чтобы проверить гипотезу, необходимо посмотреть, транскрибируются ли они в РНК. Недавние эксперименты Томаса Гингераса (Thomas Gingeras) из компании *Affymetrix* и Майкла Шнайдера (Michael Snyder) из Йельского университета свидетельствуют о том, что значительная доля межгенных участков в геноме человека активно транскрибируется. Согласно полученным данным, более половины транскрибируемых последовательностей находится вне

известных генов. Кроме того, целый ряд транскрипционно активных межгенных участков включает псевдогены, а значит, в некоторых псевдогенах еще теплится жизнь.

Наша исследовательская группа входит в консорциум лабораторий, общей задачей которых стало проникновение в глубь генетической «темной материи». В настоящее время начинается работа по созданию «энциклопедии элементов ДНК» (известной под названием *ENCODE*). Предполагается идентифицировать все части генома и установить их функции. Проведенные ранее исследования, а также предварительные результаты, полученные в рамках работы над *ENCODE*, свидетельствуют о том, что, по крайней мере, треть псевдогенов генома человека транскрипционно активна. Конечно, пока невозможно сделать какие-либо определенные выводы об их функциях, но если учесть, что некоторые псевдогены более консервативны, чем межгенные области в целом, то следует признать, что традиционный взгляд на них как на мертвый хлам ошибочен.



Реснички обонятельного эпителия человека (слева) заполнены невидимыми молекулярными рецепторами, чувствительными к запахам. У млекопитающих такие рецепторы кодирует 1 тыс. генов, несмотря на то, что у разных видов число генов обонятельных рецепторов и их доля, перешедшая в категорию псевдогенов, существенно различаются. Масштабная псевдогенизация обычно характерна для генов, отвечающих за реакцию организма на условия окружающей среды. Таким образом, особенности соотношения между числом генов и псевдогенов у данного организма могут отражать важные повороты в его эволюционной истории

Возможно, псевдогены участвуют в регуляции активности функционирующих генов. Недавно было установлено, что конечным продуктом многих генов высших организмов являются не белки, а молекулы РНК, контролирующие работу других генов. Они могут подавлять или активировать гены, либо вмешиваться в процесс трансляции и образование полноценных белков. Задокументировано, по крайней мере, два случая подобного поведения псевдогенов.

В 1999 г. Майкл О'Шей (Michael O'Shea) из Суссекского университета в Англии обнаружил, что в нервных клетках одного из видов улиток транскрибируется как ген синтазы оксида азота (*nitric oxide synthase*, NOS), так и соответствующий псев-

доген. Это может быть результатом действия естественного отбора или ухищрений природы, превративших их в регуляторные элементы.

### Протогены

Увлекательная эра молекулярной палеонтологии только начинается. Пока мы видим лишь то, что находится на поверхности псевдогенных «залежей». В глубинах их пластов скрыто множество тайн, раскрыв которые, мы узнаем удивительные вещи и о самих псевдогенах, и о геноме в целом. Современные методы анализа в этой области основываются на сравнении нуклеотидных последовательностей кандидатов в псевдогены и детально охарактеризованных генов. С их помощью можно без труда идентифицировать лишь

## Природа, возможно, придумала способ повторного использования вышедших из строя генов

доген, однако РНК-транскрипт NOS-псевдогена подавляет синтез белка на мРНК, кодируемый нормальным NOS-геном.

В 2003 г. Синдзи Хироцунэ (Shinji Hirotsune) из Медицинской школы в Саитама, Япония, выявил корреляцию между пороками развития экспериментальных новорожденных мышат и изменением в одном из псевдогенов регуляторного гена *Makorin1*. Выяснилось, что нарушения развития связаны с инактивацией этого гена. Сам исследователь никаких манипуляций с ним не проводил, но он случайно внес нарушения в псевдоген *Makorin1*, что повлияло на работу нормального гена.

Можно рассмотреть еще более 25 случаев проявления активности псевдогенов (часто это касается только определенных клеток того или иного организма), однако подобные наблюдения носят предварительный характер. Что же касается NOS- и *Makorin1*-псевдогенов, то трудно представить, что они с самого начала играли такую же роль, как сейчас. Скорее всего, их реактивация

молодые псевдогены, однако не удается зарегистрировать появившиеся очень давно и претерпевшие существенные изменения.

Большой интерес представляет недавнее открытие, состоящее в том, что некоторые псевдогены проявляют признаки активности, а часть из них ожили и теперь кодируют функциональные белки. В результате детального сравнительного анализа нуклеотидных последовательностей выяснилось, например, что один из генов крупного рогатого скота, кодирующий фермент рибонуклеазу, большую часть своей жизни просуществовал как псевдоген и лишь недавно был реактивирован. Обнаружились также различия среди одних и тех же псевдогенов у разных людей. Так, у некоторых из них небольшая часть псевдогенов белков обонятельных рецепторов превратилась в полноценные гены. Возможно, это произошло в результате случайных мутаций, нивелировавших те нарушения, которые когда-то инактивировали соответствующие гены. Но не исключено, что указанные



различия связаны с индивидуальными особенностями человека: известно, что есть люди, обладающие необычайно острым обонянием.

Согласно данным последних исследований, у дрожжей некоторые псевдогены поверхностных белков реактивируются в ответ на стрессорные воздействия. Таким образом, псевдогены — это не только умершие гены: среди них есть протогены, т.е. еще не родившиеся гены. До поры до времени они находятся на задворках генома, но затем в силу тех или иных причин превращаются в полноценные гены. ■

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

■ Human Specific Loss of Olfactory Receptor Genes. Yoav Gilad et al. in Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Vol. 100, No. 6, pages 3324–3327; March 18, 2003.

■ Pseudogenes: Are They «Junk» or Functional DNA? Evgeniy S. Balakirev and Francisco J. Ayala in Annual Review of Genetics, Vol. 37, pages 123–151; December 2003.

■ Large-Scale Analysis of Pseudogenes in the Human Genome. Zhaolei Zhang and Mark Gerstein in Current Opinion in Genetics & Development, Vol. 14, No. 4, pages 328–335; August 2004. [www.pseudogene.org/](http://www.pseudogene.org/)



Филип Росс

# КАК ВОСПИТАТЬ ГЕНИЯ?

Занятия, требующие усилий, становятся ключом к достижению успеха в шахматах, классической музыке, футболе и многих других областях. Современные исследования показывают, что мотивация оказывается при этом более важным фактором, чем наличие врожденных способностей

## Исследование процессов мышления у шахматных гроссмейстеров помогло понять, каким образом люди становятся компетентными специалистами и в других областях

**Ч**еловек ходит от одного шахматного стола к другому, ему достаточно одного взгляда на доску, чтобы сделать ход. Его противники — почти три десятка шахматистов-любителей. На дворе 1909 г., блистательный игрок — кубинец Хосе Рауль Капабланка, результат игры — сухой счет: 28 побед в 28 партиях. Упомянутый сеанс одновременной игры был частью турне, в котором гроссмейстер выиграл 168 партий подряд.

Как же ему удавалось играть столь блистательно, столь быстро? И на сколько ходов он мог просчитать возможные комбинации? «Я вижу только на один ход вперед, — говорил Капабланка, — но это всегда правильный ход».

Его сентенция кратко выразила то, что в дальнейшем было подтверждено целым столетием исследований в области психологии: превосходство мастера-шахматиста над новичком обычно проявляется с первых же секунд. Столь же быстрое восприятие, базирующееся на знании, которое иногда называют апперцепцией, свойственно компетентным специалистам и в других областях. Подобно тому, как гроссмейстер может вспомнить все ходы в только что сыгранной им партии, профессиональный музыкант зачастую способен записать партитуру сонаты, которую он слышал всего

один раз, а опытному врачу подчас достаточно лишь взглянуть на пациента, чтобы поставить точный диагноз.

Но как приобретаются столь экстраординарные навыки? Что здесь важнее — талант или интенсивная тренировка и практика? В поисках ответа на подобные вопросы психологи принялись изучать мыслительные способности выдающихся шахматистов. В результате появились новые теории, объясняющие, как происходит организация и воспроизведение информации. Такие исследования крайне важны, в частности, для сферы образования, т.к. методы, применяемые шахматистами для развития своих навыков, в будущем могут быть использованы для обучения школьников чтению, письму и арифметике.

### Дрозофила когнитивных наук

Как показывают многочисленные исследования, постоянно используемый навык формируется с самого детства, развиваясь «линейно и непрерывно лет до 35, и достигает к этому возрасту максимума», — говорит Джон Бок (John Bock), антрополог из Университета штата Калифорния в Фуллертоне. На то, чтобы подготовить нейрохирурга, уходит меньше времени.

Если человек ярко не выделяется своими способностями на фоне среднестатистического уровня коллег, его нельзя назвать по-настоящему квалифицированным специалистом, он может считаться лишь обладателем хорошего диплома. Такие люди, к сожалению, встречаются слишком часто. Исследования последних двух десятилетий показали, что если судить строго, то профессиональные биржевые игроки действуют не лучше, чем любители, истинные ценители вин различают напитки едва ли тоньше, чем профаны, а известные психиатры способны помочь пациентам не больше, чем их коллеги, не обремененные степенями и званиями. И даже когда наличие компетентности не вызывает сомнений, например, в области

образования или бизнеса, ее зачастую трудно измерить, а тем более объяснить.

Навык игры в шахматы все же можно измерить, разложить на компоненты, подвергнуть лабораторным экспериментам и без особых трудностей наблюдать в естественной обстановке — в зале соревнований. Именно поэтому шахматы стали главным и единственным полигоном для изучения теорий мышления: эту игру в шутку даже называли «дрозофилой когнитивных наук».

Изучение навыков игры в шахматы продвинулось дальше простого подсчета числа выигрывшей. Статистические формулы позволяют сравнивать новые результаты с прежними и засчитывают победу в зависимости от силы противника. В результате формируются рейтинги, которые предсказывают исход партии с поразительной точностью. Если игрок А превосходит соперника Б на 200 единиц, то А выиграет у Б в 75% случаев. Такие расчеты верны как для игроков высшего уровня, так и для любителей. Российский гроссмейстер Гарри Каспаров, имеющий рейтинг 2812, выиграет 75% партий у Яна Тиммана из Нидерландов, рейтинг которого — 2616. Аналогичным образом игрок с рейтингом 1200 (около медианы) выиграет 75 раз из 100 у шахматиста с рейтингом 1000 (примерно на уровне 40-го перцентиля). Подобные измерения позволяют психологам оценивать квалификацию по реальным результатам, а не по репутации, и проследить изменения навыков данного игрока на протяжении всей его карьеры.

Еще одной причиной того, что исследователи когнитивных процессов выбирают в качестве модели шахматы, а не бильярд или, скажем, бридж, стала репутация игры, которая, говоря словами немецкого поэта Вольфганга Гете, служит пробирным камнем интеллекта. Фантастические способности шахматных мастеров давно связывали с их почти магической силой ума, которая проявляется ярче всего в играх вслепую, когда игрокам не разрешается ▶

смотреть на доску. В 1894 г. французский психолог Альфред Бинэ (Alfred Binet), один из изобретателей первого теста на интеллект, попросил крупных шахматистов описать процесс их мышления в ходе игры. Он начал с предположения, что они держат в голове почти фотографическую картинку доски, но вскоре пришел к выводу, что их восприятие куда более абстрактно: гроссмейстер пользуется лишь общим знанием о том, где находится данная фигура относительно других. Аналогичный механизм позволяет нам, напри-

подробности игры, поскольку он может по своему желанию реконструировать любую конкретную деталь на основе хорошо организованной системы связей.

Разумеется, если обладание таким сложным структурированным знанием объясняет не только успех в игре вслепую, но также и другие способности выдающихся шахматистов (расчет и планирование), тогда квалификация в игре будет зависеть не столько от врожденных способностей, сколько от специальной подготовки. Голландский психолог

объема рассматриваемой информации не происходило: шахматные короли анализировали не большее число ходов, а лучшие из возможных (именно об этом некогда говорил Капабланка).

Недавние исследования показали, что на результаты, полученные де Гротом, повлиял характер позиций, выбранных им для проведения теста. Чтобы гроссмейстеры смогли показать себя, им требуется такая расстановка фигур, при которой принципиально важно проанализировать множество точных вычислений, — что и было продемонстрировано. В подобной ситуации они будут проводить более глубокий поиск возможных ходов, чем начинающий шахматист. Точно так же опытный физик в состоянии проанализировать намного больше возможностей решения той или иной задачи, чем студент. Однако в обоих случаях специалист полагается не столько на более развитую способность анализа, сколько на превосходящий багаж структурированного знания. Столкнувшись с трудной ситуацией, слабый игрок может просчитывать варианты целых полчаса, нередко заглядывая на множество шагов вперед, и все равно упустит свой шанс, в то время как гроссмейстер сразу увидит правильный ход без какого-либо сознательного анализа.

Де Грот провел следующий опыт: он просил своих испытуемых рассматривать позицию на шахматной доске в течение некоторого времени и затем попытаться восстановить ее по памяти. Результаты соответствовали мастерству игроков: если начинающие изучали расположение фигур в течение 30 секунд и могли запомнить лишь некоторые детали, то мастера обычно, лишь глянув на доску, могли в точности описать всю позицию. Таким образом, речь идет об особой форме памяти, специфичной по отношению к позициям, характерным для игры. Причем подобные особенности восприятия не являются врожденными, а приобретаются в результате тренировок. В общих же тестах на память гросс-

## Превосходство мастера игры в шахматы над новичком проявляется с первых же секунд

мер, помнить расположение станций на линиях метро.

Участник игры вслепую знает все детали текущей партии и помнит ключевые моменты прошлых игр. Предположим, что он вдруг забыл, где находится пешка. Он найдет ее, проанализировав стереотипные стратегии открытия партии — хорошо изученной фазы игры с относительно небольшим количеством вариантов. Или же игрок может воспроизвести логику одного из своих предыдущих ходов, размышляя, например, так: «Я не мог съесть слона два хода назад, следовательно, эта пешка должна была мне мешать...». Ему не обязательно постоянно держать в голове все

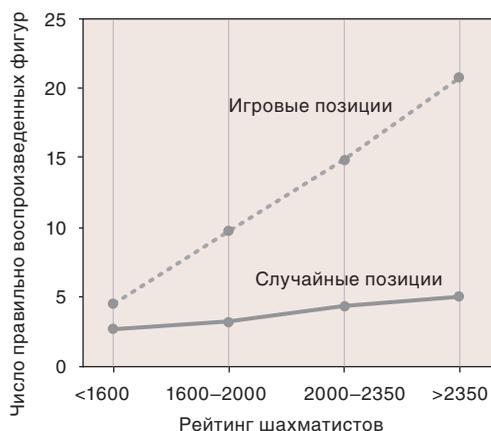
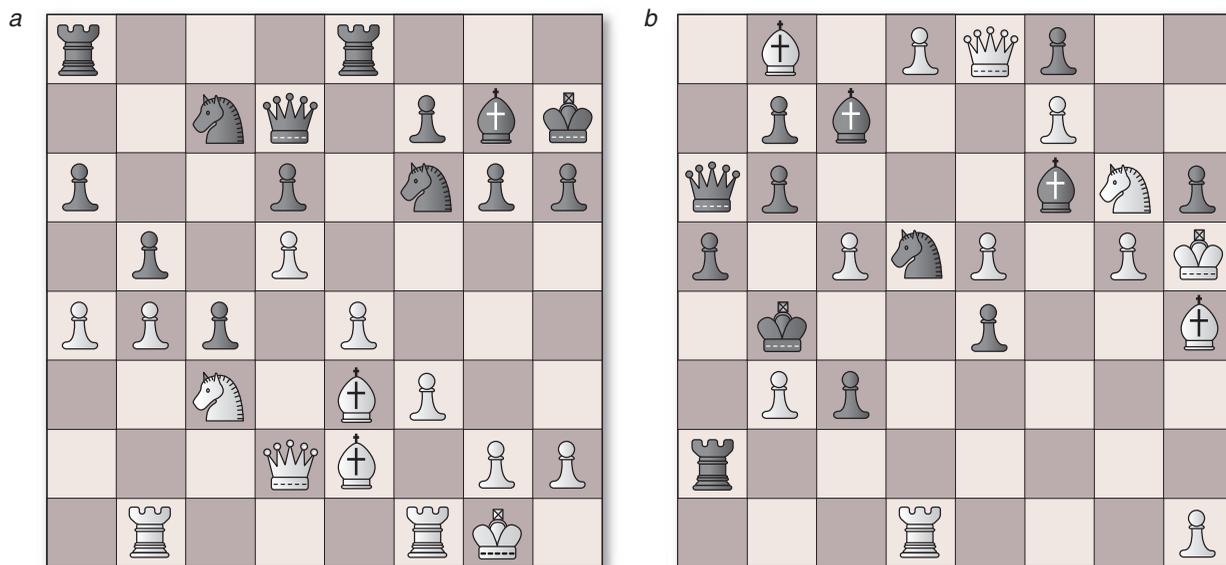
Адриан де Грот (Adriaan de Groot), сам будучи выдающимся шахматистом, подтвердил данное представление в 1938 г., воспользовавшись своим участием в подготовке крупного международного турнира в Голландии, чтобы сравнить способности средних и сильных игроков с потенциалом ведущих мировых гроссмейстеров. В частности, он просил участников описать ход их мысли, возникающий при виде позиций, выбранных из различных партий турнира. Он обнаружил, что хотя сильные шахматисты способны проанализировать значительно больше возможностей, чем слабые, начиная с определенного уровня мастерства дальнейшего увеличения

### ОБЗОР: ЧЕМУ НАС НАУЧИЛИ ШАХМАТЫ

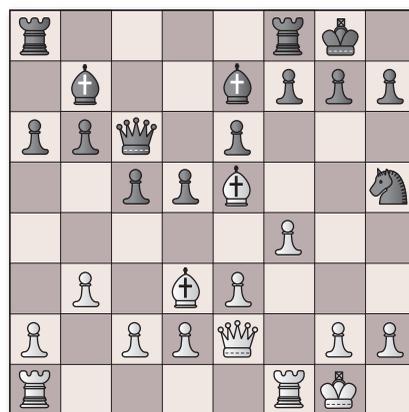
- Поскольку мастерство шахматиста легко измерить и изучить в ходе лабораторных экспериментов, эта игра стала важным полигоном для проверки теорий в области когнитивных наук.
- Исследователи обнаружили, что гроссмейстеры полагаются на обширное знание игровых позиций. Некоторые специалисты предположили, что великие шахматисты организуют информацию в виде блоков, которые легко извлечь из долговременной памяти и манипулировать ими на уровне рабочей памяти.
- Чтобы накопить багаж структурированных знаний, гроссмейстеры должны затратить годы на усиленные занятия и всякий раз браться за задачи, слегка превосходящие их возможности. Видимо, выдающиеся музыканты, математики и спортсмены приобрели свое мастерство тем же путем, а соревнования и радость победы служили им мощным стимулом.

## ПАМЯТЬ ГРОССМЕЙСТЕРА

Эксперименты показывают, что память ведущих игроков настроена на типичные шахматные позиции. В 13 исследованиях, проведенных с 1973 по 1996 г., шахматистам различного уровня показывали позиции из реальных игр (а) и те, что были получены путем случайного размещения фигур (b). От шахматистов требовалось рассмотреть расположение фигур не более 10 секунд, а затем воспроизвести его по памяти. Результаты (график внизу) показали, что мастера (с рейтингом 2200 или более) и гроссмейстеры (2500 и выше) запоминали реальные игровые позиции значительно лучше слабых игроков, однако когда дело касалось случайного размещения фигур, чемпионы не имели существенных преимуществ. Вероятно, такая тонко настроенная долговременная память принципиально важна для высококвалифицированного шахматиста



Структурированное знание шахматных позиций позволяет гроссмейстерам быстро находить правильный ход. Позиция, изображенная справа, возникла в ходе известной игры 1889 г. между Эммануэлем Ласкером (Emanuel Lasker) (белые) и Иоганном Бауером (Johann Bauer) (черные). Если начинающий игрок, чтобы увидеть выигрышный ход белых, произведет обширный анализ позиций, то любой гроссмейстер распознает его сразу. Правильный ход показан на стр. 61.



мейстеры ни в чем не превосходят остальных людей.

Сходные таланты демонстрируют также игроки в бридж, способные воспроизвести комбинации карт во многих играх, компьютерные программисты, наизусть помнящие огромные участки компьютерного кода, музыканты, которые держат в памяти целые произведения. В целом, наличие такой памяти, проявляющейся в той или иной

области, служит стандартным способом проверки квалификации.

Тот факт, что специалисты более полагаются на структурированное знание, чем на анализ, подтверждается и конкретными примерами. Так, некий начинающий шахматист D.H. за девять лет сделал поразительные успехи и к 1987 г. стал одним из лидирующих игроков Канады. Наблюдавший за ним Нейл Чарнесс (Neil Charness), профессор психоло-

гии Университета штата Флорида обратил внимание, что секрет успеха был не в более глубоком анализе шахматных позиций, а в увеличившемся объеме знаний о них и связанных с ними стратегий.

### Теория блоков

В 1960-х гг. Герберт Саймон (Herbert A. Simon) и Вильям Чейз (William Chase) из Университета Карнеги-Меллона, чтобы лучше понять ▶

механизм памяти специалистов, попытались исследовать ее ограничения. Они просили шахматистов различного уровня восстановить по памяти искусственно созданные шахматные позиции, т.е. случайное расположение фигур на доске, а не то, что возникло в ходе реальной игры. Корреляция между мастерством игрока и точностью воспроизведения «шахматной обстановки» была значительно менее выражена для искусственных случайных позиций по сравнению с реальными.

Исследователи продемонстрировали, что память шахматиста еще более специфична, чем казалось ранее, поскольку она настроена не просто на саму игру, а на типичные шахматные ходы. Подобные эксперименты подтвердили результаты предыдущих опытов, доказавших, что способности в одной области, как правило, не распространяются на другую. Американский психолог Эдвард Торндайк (Edward Thorndike) еще сто лет назад первым обратил внимание на это обстоятельство, заметив, что изучение, скажем, латинского языка, не помогает овладеть английским, а человек, мастерски доказывающий геометрические

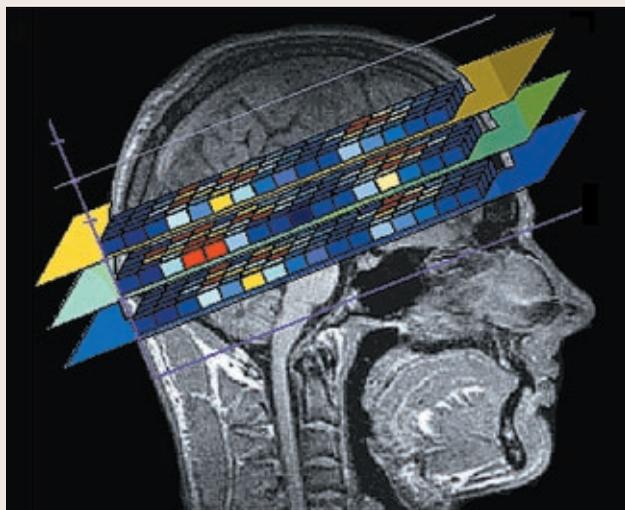
теоремы, не всегда способен логически мыслить в повседневной жизни.

Чтобы понять особенности памяти гроссмейстеров, Саймон воспользовался моделью, основанной на осмысленных паттернах, названных им блоками, что, по его мнению, объясняет, как выдающимся шахматистам удается оперировать огромным количеством данных, не перегружая рабочую память. В свое время психолог Джордж Миллер (George Miller) из Принстонского университета произвел известную ныне оценку пределов рабочей памяти, своего рода буфера для временных записей у нас в голове. В своей статье «Магическое число семь плюс-минус два» (*The Magical Number Seven, Plus or Minus Two*), вышедшей в 1956 г., он доказал, что люди способны держать в голове одновременно от пяти до девяти объектов. Саймон утверждал, что при помощи иерархической «упаковки» информации шахматисты получают возможность преодолеть этот предел, рассматривая не отдельные фигуры и ходы, а целые блоки.

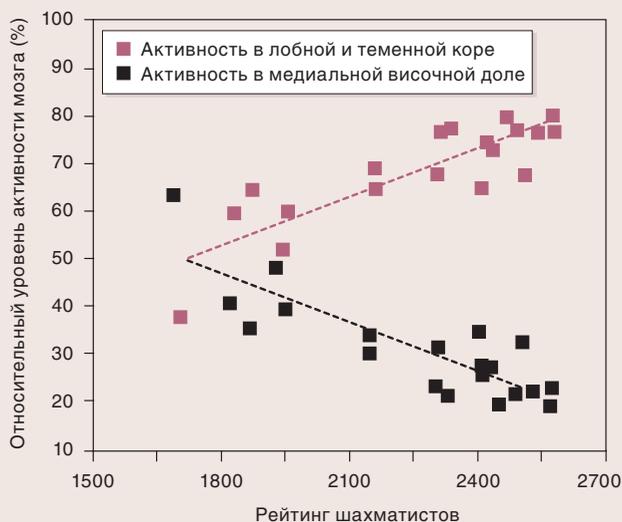
Воспользуемся литературным примером. Возьмем, например, предложение *Mary had a little lamb* («У Мэри

был ягненок»). Количество блоков информации в предложении зависит от знания английского языка и самого стихотворения. Для большинства англичан данное предложение будет частью более крупного блока — известного стихотворения. Для человека, владеющего английским, но не знакомого с произведением, приведенная фраза будет отдельным самостоятельным блоком. Для того, кто может прочесть слова, но не понимает их значения, отрывок предстанет пятью блоками, и он же покажется 18 блоками тому, кто знает лишь буквы, но не может сложить их в слова.

Аналогичным образом предложенную информацию воспринимают и шахматисты. Для начинающего игрока доска с двадцатью фигурами будет содержать столько информационных блоков, сколько комбинаций могут составлять фигуры. А гроссмейстер увидит позицию как «фианкеттированный слон на рокированном королевском фланге» в сочетании с «блокированными пешками» и таким образом спрессует всю картину в пять-шесть блоков. Оценивая время, необходимое



Активность мозга чемпионов по шахматам отличается от таковой у новичков. В ходе исследования эксперты произвели магнитоэнцефалографию (измерение магнитных полей, вызываемых электрическими токами в мозге) у добровольцев, играющих в шахматы против компьютера. У слабых игроков (фото слева) активность мозга была более выражена в медиальной височной доле (левая сторона цветных срезов), чем в лобной и теменной коре (правая сторона). Данные показатели говорят о том, что шахматисты-любители анализировали непривычные для них новые ходы. У гроссмейстеров же наиболее активными были лобная и теменная кора, что соответствует извлечению информации из долговременной памяти



на формирование нового блока в памяти, и число часов, которые игрок должен провести за изучением шахмат, прежде чем станет гроссмейстером, Саймон подсчитал, что мастер владеет приблизительно 50–100 тыс. блоками шахматной информации. Гроссмейстер может извлечь из памяти любой из них, лишь взглянув на доску, подобно тому, как большинство англичан вспоминают стихотворение *Mary had a little lamb*, едва услышав первые слова.

Теория блоков все же не могла полностью объяснить некоторые особенности памяти, в том числе умение специалистов демонстрировать свои удивительные способности даже когда их отвлекают. Андерс

в 1995 г. он и Уолтер Кинч (Walter Kintsch) из Колорадского университета обнаружили, что если профессионального чтеца прервать на полуслове, ему потребуется всего несколько секунд, чтобы вернуться к тексту. Исследователи назвали данный феномен долговременной рабочей памятью, хотя такой термин по сути является оксюмороном, т.к. соотносит долговременную память с мышлением, что всегда считалось неверным. Однако выполненные в 2001 г. в Констанцском университете в Германии томографические исследования подтвердили приведенную теорию: они продемонстрировали, что у шахматистов высокого уровня долговременная память

## Сотворение гениев

Все теоретики сходятся в одном: чтобы создать в памяти подобные структуры, требуется масса усилий. Саймон сформулировал свой собственный психологический закон — «правило десяти лет», согласно которому примерно столько времени напряженного труда требуется для безупречного овладения каким-либо мастерством. Даже такие юные гении, как математик Гаусс, композитор Моцарт и шахматист Бобби Фишер, должны были затратить эквивалентные усилия — просто они начали раньше и, вероятно, занимались более усердно, чем остальные.

Согласно такой точке зрения, появление в последние годы большого числа одаренных детей-шахматистов просто отражает внедрение новых методов обучения с применением компьютерных технологий, которые позволяют ребятам изучать гораздо больше партий, сыгранных мастерами, и с помощью соответствующих программ играть на высоком уровне значительно чаще, чем их предшественники. В 1958 г. Фишер произвел сенсацию, получив титул гроссмейстера в возрасте 15 лет; сегодняшний рекордсмен, Сергей Карякин с Украины, достиг тех же высот в 12 лет.

Эрикссон утверждает, что важна не тренировка сама по себе, а «занятия, требующие усилий», когда человек постоянно пытается решать задачи, несколько превосходящие его возможности. Энтузиаст может часами играть в шахматы, в гольф, или на музыкальном инструменте, но так и не выйдет за пределы любительского уровня. Ученик же, не просто повторяющий те или иные действия, а стремящийся выйти за пределы своих возможностей, в конце концов достигнет мастерства. То есть имеет значение не время, проведенное непосредственно за игрой в шахматы, а сознательная тренировка, основанная на преодолении. Что касается соревнований, то они выявляют слабые места, на которых нужно сконцентрировать внимание при последующем обучении. ▶

## Для овладения любой областью знаний требуется примерно десять лет интенсивного труда

Эрикссон (K. Anders Ericsson) из Университета штата Флорида и Чарнесс убеждены, что должен существовать какой-то другой механизм, позволяющий мастерам своего дела использовать долговременную память так, будто она тоже стала буфером для временных записей. «С помощью теории блоков невозможно объяснить, каким образом опытным шахматистам удается играть вслепую, поскольку сначала нужно знать позицию, а затем исследовать ее в своей памяти», — размышляет Эрикссон. Подобные действия требуют некоторого изменения устойчивых блоков. Для сравнения: если попросить человека прочитать наизусть стихотворение *Mary had a little lamb* задом наперед, то у него вряд ли получится с первого раза безошибочно справиться с заданием. Однако игра гроссмейстеров вслепую обычно безупречна.

В ходе своих изысканий Эрикссон также исследовал особенности памяти врачей, накапливающих информацию в долговременной памяти и затем обращающихся к ней, чтобы поставить диагноз. Эрикссон приводит еще один любопытный пример:

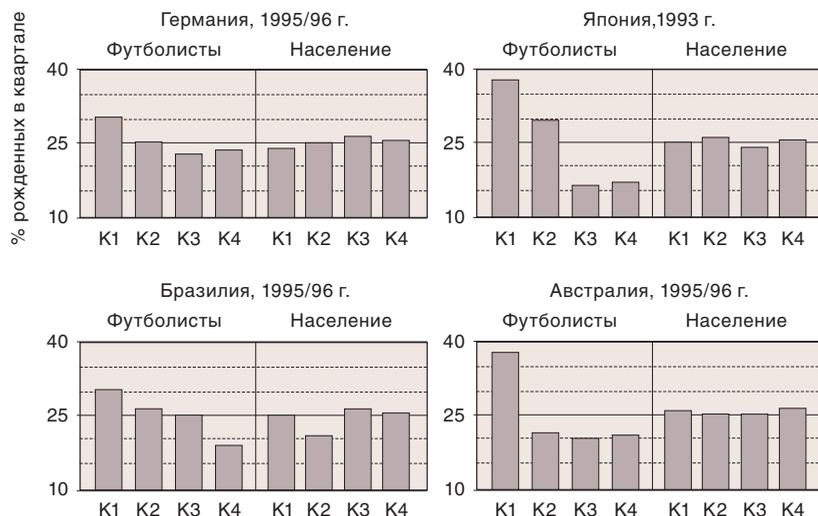
задействована гораздо в большей степени, чем у новичков.

Фернан Гобэ (Fernand Gobet) из Брюнельского университета в Лондоне выступил с альтернативной теорией, разработанной им совместно с Саймоном в конце 1990-х гг. Она расширяет теорию блоков за счет введения понятия высокоспецифичных больших паттернов, состоящих из десятков комбинаций. Такой шаблон, по их мнению, имеет некоторое количество ячеек, куда гроссмейстер может помещать некие переменные, например, пешку или слона. Шаблон может существовать, скажем, для такого понятия, как «положение изолированной проходной пешки из защиты Нимцовича». Шахматист может изменить в ней один элемент, обозначив ее для себя как ту же самую позицию «минус чернопольные слоны». Если снова прибегнуть к аналогии со стихами, то это все равно, что запомнить вариацию строфы *Mary had a little lamb*, заменяя в ней отдельные слова на их ритмические эквиваленты, например, *Mary* на *Larry* и т.п. Каждый, кто знает исходный шаблон, без труда усвоит и измененное предложение.

## ТРЕНИРОВКА БЕРЕТ ВЕРХ НАД ТАЛАНТОМ

Результаты исследования деятельности профессиональных футболистов показали, что они обязаны своим успехом не столько таланту, сколько тренировке. Как выяснилось, дни рождения многих выдающихся игроков Германии, Бразилии, Японии и Австралии приходились на тот квартал года (К1), который следует сразу за датой приема в детские футбольные секции (*графики справа*), т.е. в момент поступления в секцию они были старше остальных, выше, сильнее, что давало им преимущество, позволяя чаще захватывать мяч и забивать голы. Успех в первые годы обучения побуждал их стремиться к дальнейшему совершенствованию. В результате процент таких футболистов в профессиональных лигах крайне высок. Мощная мотивация и практика объясняют необычайные успехи таких юных гениев, как австрийский композитор Вольфганг Амадей Моцарт (*слева*) и американский игрок в гольф Тайгер Вудс (*Tiger Woods*) (*справа*)

Примечание: в Германии, Бразилии и Австралии принимали в секции родившихся до 1 августа, в Японии — до 1 апреля



Нетрудно заметить, что новичок в любом деле (будь то игра в гольф или вождение машины) довольно быстро совершенствуется на первом этапе именно потому, что прилагает значительные усилия. Однако, достигнув удовлетворительного уровня, например, сравнившись по умению с приятелями или получив водительские права, многие успокаиваются. В дальнейшем их действия доходят до автоматизма и потому не поддаются совершенствованию. Между тем истинный профессионал своего дела не останавливается на достигнутом, способен критически оценивать свое мастерство, сознательно развивать и дополнять его, достигая таким образом лидерства.

С течением времени планка высокой квалификации тоже поднимается. Теперь даже школьники

старших классов пробегают дистанцию в 1,6 км за четыре минуты, а студенты консерватории играют пьесы, которые раньше решались исполнять лишь виртуозы. Что касается шахмат, то недавно Джон Нанн (John Nunn), британский математик и гроссмейстер, с помощью компьютера сравнил ошибки, совершенные во всех играх двух международных турниров, один из которых проходил в 1911 г., а другой в 1993 г. Оказалось, что современные шахматисты играют намного лучше. Затем Нанн изучил все игры одного игрока среднего уровня, проведенные в 1911 г., и заключил, что его рейтинг сегодня не превышал бы 2100, т.е. был бы на сотни пунктов ниже гроссмейстерского уровня. «И это еще в хороший день и с попутным ветром», — шутит Нанн. Высот же сегодняшних

лидеров не достигали даже лучшие мастера того времени.

Напомним, однако, что Капабланка и его современники не имели ни компьютеров, ни баз данных по шахматным партиям. Они должны были постигать все самостоятельно, равно как и Бах, Моцарт и Бетховен, и если они и уступали сегодняшним профессионалам в технике, то намного превосходили их по силе творческого мышления. Тем и отличается Ньютон от новоиспеченного обладателя научной степени по физике.

Прочитав вышесказанное, многие скептики должны, наконец, потерпеть терпение. Наверняка, скажут они, для того, чтобы попасть в Карнеги-холл, требуется нечто большее, чем всего лишь практика, практика и еще раз практика. Однако, как ни странно, уверенность в необ-

ходимости врожденного таланта, столь сильная среди самих специалистов и их учителей, практически не подкреплена никакими фактами. В 2002 г. Гобе провел исследование с участием британских шахматистов всех уровней, от любителей до гроссмейстеров, и не обнаружил никакой связи между качеством их игры и наличием каких-либо выдающихся зрительно-пространственных способностей, которые оценивались с помощью тестов на запоминание формы фигур.

Венгерский педагог Ласло Полгар (László Polgár) провел любопытный эксперимент, продемонстрировавший возможность намеренного воспитания таланта. Он обучал дома трех своих дочерей игре в шахматы, ежедневно занимаясь с ним по шесть часов. В результате одна из них стала мастером международного уровня, а две других — гроссмейстерами. За всю историю шахмат в одной семье еще не рождалось столько шахматистов подобного уровня. Младшая из сестер Полгар, 30-летняя Юдит (Judith Polgár) сегодня занимает 14-ю строчку в мировом рейтинге.

Эксперимент Полгара доказал две вещи: что гроссмейстеров можно воспитать, и что женщина способна стать гроссмейстером. Неслучайно после того, как Ласло Полгар опубликовал книгу об обучении игре в шахматы, число талантливых малолетних шахматистов возросло. Два столетия ранее подобный эксперимент осуществил отец Моцарта, в результате значительно увеличилось число одаренных юных музыкантов.

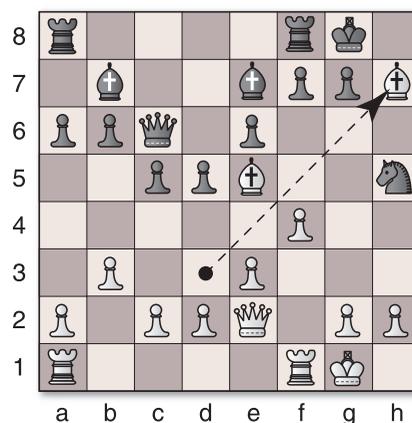
По всей видимости, мотивация оказывается важнее, чем врожденная способность. Именно поэтому в музыке, шахматах и спорте, т.е. там, где квалификация определяется по результатам соревнований, а не по академическим достижениям, профессионализма стали достигать дети (правда, при условии, что их опекают и поддерживают родители-энтузиасты).

Более того, достигнутые успехи ведут к новым вершинам, поскольку

каждое достижение ребенка усиливает его мотивацию. Проведенное в 1999 г. исследование футболистов показало, что лучшие из них на момент принятия в детский футбольный клуб были старше среднего возраста остальных детей, они изначально были выше, сильнее, т.е. имели некоторые превосходства над товарищами по кружку. Поэтому им чаще удавалось захватить мяч, забить гол, а достигнутый успех мотивировал их совершенствоваться и дальше.

Многие педагоги уверены, что могут распознать в ребенке талант. На самом деле они путают способности и раннее развитие. Послушав игру юного виолончелиста, невозможно понять, стала его виртуозность следствием врожденных данных или плодом упорных занятий. Капабланка, которого до сих пор считают величайшим «природным» шахматистом, хвастался, что никогда не учился игре. Однако он был отчислен из Колумбийского университета за неуспеваемость, причиной которой отчасти было то, что он проводил много времени за игрой в шахматы. Его прославленная способность мгновенно схватывать ситуацию родилась в ходе практики, а не заменила ее.

Большинство психологических исследований показывает, что мастерами не рождаются, а становятся. И тот факт, что из ребенка можно вырастить высококвалифицированного специалиста, ставит новые задачи перед школьным образованием. Каким образом учителя могут подтолкнуть учеников к занятиям, требующим усилий? Роланд Фрайер (Roland G. Fryer, Jr.), экономист из Гарвардского университета, в качестве эксперимента мотивировал детей с низкой успеваемостью денежным вознаграждением. В одной из школ Нью-Йорка в настоящее время осуществляется программа, предусматривающая проведение ежемесячного тестирования учеников и присуждение им за хорошие оценки небольших премий в размере \$10–20. Предварительные результаты выглядят



Выигрышный ход белых: слон съедает пешку на h7. Черный король затем берет слона, белый ферзь ест черного коня на h5, ставя шах и заставляя черного короля отойти назад на g8. Другой белый слон съедает пешку на g7, где ее берет черный король. Двойная жертва слонов открывает путь для проходной пешки и атаки ладьей, вынуждая черных отдать своего ферзя, чтобы избежать мата. Эммануэль Ласкер, выигравший эту партию, в 1894 г. стал мировым чемпионом по шахматам и сохранял свой титул на протяжении 27 лет, пока не уступил его Хосе Раулю Капабланке

многообещающими. Вместо того чтобы вечно размышлять над вопросом: «Почему Джонни не умеет читать?», учителя, наверное, должны спрашивать себя: «Разве может существовать что-то такое, чему он не сможет научиться?» ■

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- The Rating of Chessplayers, Past and Present. Arpad E. Elo. Arco Publishing, 1978.
- Thought and Choice in Chess. Adriaan de Groot. Mouton de Gruyter, 1978.
- Expert Performance in Sports: Advances in Research on Sport Expertise. Edited by Janet L. Starkes and K. Anders Ericsson. Human Kinetics, 2003.
- Moves in Mind: The Psychology of Board Games. Fernand Gobet, Alex de Voogt and Jean Retschitzki. Psychology Press, 2004.
- The Cambridge Handbook of Expertise and Expert Performance. Edited by K. Anders Ericsson, Paul J. Feltovich, Robert R. Hoffman and Neil Charness. Cambridge University Press, 2006.



Результаты грабительских раскопок.  
Так выглядел некрополь Дейр эль-Баната, когда ЦЕИ РАН приступил к работам

По материалам беседы  
с известным российским египтологом  
Алексеем Кролом

# ИСПОВЕДЬ МУМИИ

Археологические  
находки в Фаюмском  
оазисе опровергают  
некоторые  
устоявшиеся  
представления  
о поздних  
этапах развития  
цивилизации  
Древнего Египта

**Н**а протяжении нескольких лет Центр египтологических исследований Российской Академии наук (ЦЕИ РАН), представительство которого появилось в Каире в 2001 г., проводит археологические исследования в узловых точках древнеегипетской цивилизации — Александрии, Луксоре (Долине царей), Фаюмском оазисе, а также там, где находилась древнейшая столица Мемфис. Изучая памятники материальной и письменной культуры, архитектуру, домашнюю утварь, статуэтки, украшения, папирусы, саркофаги, мумии, предметы погребального ритуала, специалисты по крупнякам собирают знания, способствующие пониманию путей развития одной из величайших цивилизаций прошлого.

## Неведомый Египет

До недавнего времени знания о египетской истории ограничивались данными о жизни 0,5–1% людей, находившихся на вершине социальной лестницы. Основными источниками информации для специалистов служили пирамиды и царские захоронения, изобиловавшие погребальной

утварью, украшенные росписями, позволявшими составить некоторое представление о быте, занятиях и досуге сильных мира сего и их приближенных. Мы располагаем сведениями о династиях фараонов и их деяниях, о битвах и жертвоприношениях, живительных разливах Нила и жестоких засухах.

Однако как ни значительны открытия археологов, общая картина жизни Древнего Египта по-прежнему достаточно туманна. Ее можно сравнить с неразрезанными листами толстой книги, о содержании которой приходится судить лишь по оглавлению. Фараоны, сановники и высшее жречество — это оглавление, а содержание составляют статисты истории — крестьяне и ремесленники, солдаты и рабочий люд, те, чью индивидуальность нельзя различить во тьме тысячелетий. Именно они — те кирпичики, из которых складывается история. Именно они становятся создателями тех материальных и духовных богатств, по остаткам которых современные исследователи могут судить о быте и нравах прошлого. Между тем, очень трудно добыть ►



А.А. Крол проводит визуальное изучение мумии греко-римского времени

какие-либо сведения о том, как жила основная масса людей в давние времена, как они выглядели, какие имена носили, чем болели и от чего умирали — ведь они не могли оставить своих статуй, вырубленных в камне, и записей на драгоценных папирусах. Археологические раскопки, которые осуществляет ЦЕИ РАН в Фаюмском оазисе, в раннехристианском некрополе монастыря Дейр эль-Банат, помогают отчасти восполнить пробелы.

### **Фаюмский оазис. Девичий монастырь**

Фаюмский оазис расположен недалеко от Каира и отделен от долины Нила грядой невысоких холмов и песками Ливийской пустыни. В далеком прошлом его называли садами Египта, и размеры его в 5 раз превышали нынешние. Жизнь Фаюмского оазиса бурлила на берегах огромного озера Мойрис. Фараоны Среднего царства, стремясь высвободить плодородные земли для сельскохозяйственной обработки, распорядились провести дренажные и ирригационные работы, превратившие водоем в искусственное водохранилище. Сегодня оно называется Биркет-Карун, но его размеры стали куда скромнее, чем в древности. Тогда же был построен канал Юсуфа (Иосифа), который соединил Нил с озером,

что позволило регулировать орошение окрестных земель. Озеро выполняло важную функцию регуляции уровня воды в Ниле. В засушливые годы вода из озера поступала в долину, компенсируя низкий уровень разлива; в годы высокого подъема Нила в озере скапливалась лишняя вода, угрожавшая затопить страну. В период греческого господства, при Птолемее I (около 360–283/282 гг. IV–III вв. до н.э.), был осуществлен новый широкомасштабный ирригационный проект с целью наделения

земельными участками ветеранов армии Александра Македонского. Создание мощной системы шлюзов, каналов, дамб стало грандиозным деянием, мобилизовавшим общественные силы для управления обширным водным хозяйством и судходными каналами, которые стали крупнейшими инженерными сооружениями своего времени, вдохнувшими новую жизнь в засушливый регион. Фаюмский оазис стал настоящей житницей Египта.

Археологические раскопки ведутся в Фаюме уже много лет. Не так давно ЦЕИ РАН заинтересовал расположенный там комплекс Дейр эль-Банат, где до недавнего времени систематических исследований не проводилось. Само название в переводе с арабского означает «Девичий монастырь» — действительно, на протяжении столетий здесь жила и молилась христианская святая обитель, от которой ныне почти ничего не осталось. Сохранились руины средневековой церкви, сложенной из обожженного кирпича на вырубленном в скале фундаменте. Некогда ее окружали кельи, трапезная, всевозможные хозяйственные службы. Скорее всего, монастырь был возведен на месте значительного более ранних культовых построек, которые неоднократно



Холодный ветер амшур, дующий из Ливийской пустыни, часто заставлял приостанавливать работу

А. Невелюга (вверху); А. Крол (внизу)

перестраивались пока вражеские набеги и всепобеждающее время не разрушили их окончательно.

### Некрополь Дейр эль-Банат

Важной находкой в Дейр эль-Банате стал обширный некрополь, расположенный к югу от древнего монастыря и относящийся к греко-римскому раннехристианскому периоду. В феврале 2006 г. экспедиция ЦЕИ РАН совместно с Институтом биоархеологии (США) исследовала 74 погребения, которые позволяют по-новому взглянуть на тот период египетской истории, что пришел на смену времени фараонов.

Прежде всего, исследователи обнаружили, что на заре нашей эры в Египте по-прежнему был распространен обряд мумификации, что противоречит распространенной точке зрения, согласно которой искусство бальзамирования трупов, достигшее своего наивысшего расцвета при XXI–XXII династиях, пришло в упадок в поздний и греко-римский периоды. К сожалению, как нередко бывает, археологам пришлось идти по следам грабителей: некрополь, общая площадь раскопа которого составляет около 4 тыс. м<sup>2</sup>, был неоднократно разорен, причем наибольший ущерб ему был нанесен в 60–70 гг. прошлого века. Поэтому лишь несколько погребений представало перед учеными в первозданном, неповрежденном виде.

Кладбище использовалось на протяжении нескольких сотен лет — в верхних слоях были обнаружены могилы, относящиеся к раннехристианскому периоду, а в нижних — к греко-римскому, причем последние представлены двумя типами захоронений. Первые, очевидно, принадлежали зажиточным людям. Прямоугольные могильные ямы с двойным подбоем вырублены в плотном песчанике, их глубина составляет 1,5–1,7 м. Северная и южная стены ниш для погребения закруглены, а пол, на котором были найдены антропоморфные саркофаги, ориентированные головной частью на запад, расположен на 3–4 см выше уровня входа.

Саркофаги воспроизводили очертания человеческого тела, а на крышке был изображен портрет покойного. Внутри помещалась мумия, на голове, средней части туловища и ногах которой лентами были закреплены накладки из картонажа, напоминающего по технике изготовления папье-маше. Вероятно, тела покойных при совершении погребального обряда украшались ожерельями, браслетами, амулетами, но поскольку могилы были разграблены, ни подтвердить, ни опровергнуть данное предположение невозможно. Не было найдено и погребального инвентаря. Тем не менее, характер захоронений позволяет предположить, что они принадлежат состоятельным людям.

Второй тип греко-римских могил приютил, видимо, более скромных покойников. Их хоронили в грунтовых одиночных ямах прямоугольной формы с округлой нишей-подбоем, выкопанной в западном или восточном торце. Тела усопших, плотно завернутые в однослойную ткань и обмотанные узкими лентами, за редким исключением не удостоились саркофага и мумифицированы более дешевым способом, чем «обитатели» погребений первого типа.

Позднейшие коптские захоронения представляют собой овальные ямы глубиной 30–50 см, выкопанные в песчанике и содержащие останки от одного до четырех человек. Тела плотно заворачивали в многослойную ткань и обвязывали тонкими веревками. Иногда покой-

ных клали на пальмовые листья или тростниковые подстилки. Интересно, что во многих коптских захоронениях обнаружены мумии, т.е. мумификация умерших, вопреки распространенному мнению, практиковалась и в христианскую эпоху.

На основании полученных данных российские египтологи выдвинули рабочую гипотезу, согласно которой вплоть до V в. н.э. христианство сосуществовало с язычеством. По-видимому, их взаимоотношения были вполне мирными, что, безусловно, отличается от хрестоматийной точки зрения, утверждающей, что новая религия, едва появившись, вступила в жесточайший конфликт с прежними верованиями. Впрочем, существует версия, что это было вынужденное перемирие, поскольку удаленный от больших городов Фаюмский оазис служил убежищем для христиан, подвергавшихся гонениям. Так или иначе, но в эпоху Средневековья в Фаюме было уже около 30 коптских монастырей.

### Галерея образов

Российские египтологи и антропологи поставили перед собой задачу по обнаруженным черепам реконструировать лица людей, чьи захоронения открыты в Дейр эль-Банате, и сравнить их с изображениями на погребальных портретах. В перспективе специалисты из Центра египтологических исследований собираются воссоздать внешний облик человека ▶



среднего достатка и составить целую галерею образов жителей Фаюмского оазиса.

Но российских археологов интересует не только то, как выглядели египтяне, но и то, как они жили, чем занимались, как питались, от каких заболеваний они страдали и от чего они умирали. В 2006 г. были осуществлены краниологические, осте-

исследователи установили, что обитатели Фаюмского оазиса в основном относились к средиземноморскому антропологическому типу, были невысокого роста и редко доживали до 50 лет. Пик смертности приходился на 30–40 лет, а средняя продолжительность жизни составляла всего около 25 лет. Однако уровень рождаемости в Дейр эль-Бана-

микроэлементов (а именно, железа и йода) в пище. Анализ костного материала свидетельствует о массовой заболеваемости остеопорозом, что может объясняться недостатком йода и кальция. Изучение маркеров физических нагрузок на кости показало, что жители Дейр эль-Баната занимались преимущественно тяжелым физическим трудом.

На основании найденных черепов с помощью компьютерной томографии было сделано несколько графических реконструкций внешнего облика обитателей Девичьего монастыря. К удивлению ученых оказалось, что за две тысячи лет тип лица коптов не изменился. Антрополог Алексей Нечвалода, специалист по восстановлению внешнего облика умерших на основании метода, имеющего в своей основе знаменитый метод С. Герасимова, сделал несколько реконструкций по материалам из раскопок ЦЕИ РАН. Нечвалода никогда не был в Египте и коптов

## Египтяне верили, что портрет, точно передающий черты лица умершего, поможет душе найти покинутую ею плоть

ологические и палеопатологические исследования останков 67 человек: 19 мужчин и 23 женщин, умерших в возрасте около 30 лет, а также 25 детей, в том числе новорожденных. В целом за время экспедиции ЦЕИ РАН было изучено 157 черепов и 117 костей посткраниального скелета. На основе полученных данных

те превышал показатели смертности, и жизнь продолжалась.

Судя по всему, судьба обитателей оазиса не была легкой. Многие из них страдали от анемии, артрита, отита, пороза, переломов, рахитичной изогнутости бедренных костей, пародонтоза, что, вероятно, было вызвано недостатком важных

## ОТ ФАРАОНА ДО ЛЕНИНА: КОЛЛЕКТИВНОЕ БЕССМЕРТИЕ



В древнем Египте существовала развитая индустрия мумифицирования и производства культовых предметов, которые впоследствии опускались в гробницу вместе с умершим и должны были так или иначе послужить ему в загробном мире. Египтяне считали, что сохранность физического тела обеспечит в дальнейшем «жизнь вечную». Те, кто по тем или иным причинам не мог быть погребен должным образом, утрачивали шанс возродиться. Возможно, стремление «законсервировать» бранные останки отражало надежду на то,

что смерть не становится пределом, конечной остановкой на жизненном пути человека, и что жизнь имеет более глубокий смысл, нежели прозябание на грешной земле. Кроме того, сохранность тела была залогом самоидентификации: человек желал не бессмертия вообще, а возвращения в свою привычную оболочку, с которой ассоциировал свою личность. Душа должна была узнать свой «дом». Этой цели, кстати, служили и фаюмские портреты. После гибели цивилизации фараонов мечты о физическом бессмертии не оставили человечество. Страстные поиски философского камня, дарующего вечную жизнь, сказки о живой воде, способной воскресить мертвого, многочисленные портреты и автопортреты, надгробные средневековые скульптуры королей и т.д. — что это, как не материализация мечты о возвращении?

Не избежали обольщений и социалисты-материалисты. Иначе чем

объяснить, что после смерти Ленина в первом социалистическом государстве, основанном на принципах атеизма, тело вождя было мумифицировано и помещено в сооружение, напоминающее зиккурат или ступенчатую пирамиду Джосера? Современные мечтатели готовы заморозить свои тела или останки своих близких в ожидании, что когда-нибудь медицина научится возвращать их к жизни. Так духовный опыт Древнего Египта преломляется в веках и находит новые и неожиданные воплощения.



не видел, однако лица, из глубины веков взглянувшие на пораженных исследователей, оказались поразительно похожими на те, что участники экспедиции ежедневно видели в Фаюме, где плотность расселения христианского населения традиционно выше, чем в других частях страны.

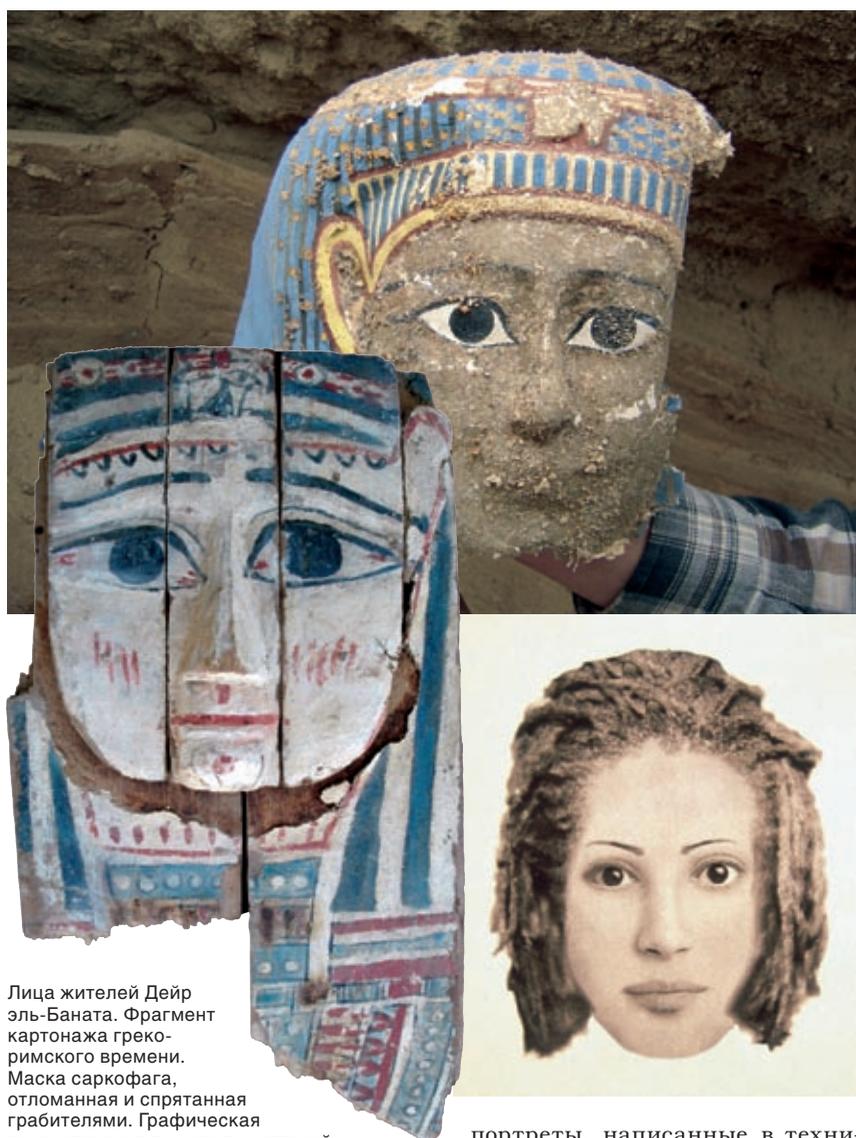
Надо сказать, за последнее время антропологи в значительной мере усовершенствовали технику реконструкций внешнего облика, активно используя данные компьютерной томографии. Это позволяет получить объемное изображение черепа, фигуры, внутренних органов человека и нередко ведет к важным открытиям. Например, изучение мумии Тутанхамона опровергло существовавшее ранее убеждение, что юный фараон пал жертвой дворцового заговора. Согласно данным компьютерного исследования, он умер естественной смертью, скорее всего, в результате заражения крови. Вероятно, он упал с лошади или с колесницы, повредил, а возможно, даже сломал ногу и внес в рану инфекцию, которая оказалась фатальной.

Сотрудники ЦЕИ РАН не намерены ограничиваться исследованием останков из Дейр эль-Баната. Они планируют с помощью компьютерной томографии исследовать мумии, хранящиеся в музейных собраниях России, в частности, в научно-исследовательском институте и музее антропологии им. Д.Н. Анучина. Ученые надеются, что современные технологии позволят пролить свет на жизнь и смерть древних египтян.

### Фаюмские портреты

Среди наиболее интересных находок, сделанных российскими египтологами в некрополе Дейр эль-Банат, можно выделить расписные маски, фрагменты картонажей и фаюмские портреты.

Погребальные изображения, получившие название фаюмских портретов, давно известны египтологам, т.к. впервые они были обнаружены в 80-х гг. XIX в. благодаря раскопкам английского археолога Флиндерса Питри в Хаваре, где находятся



Лица жителей Дейр эль-Баната. Фрагмент картонажа греко-римского времени. Маска саркофага, отломанная и спрятанная грабителями. Графическая реконструкция по черепу коптской девушки 16-17 лет

пирамида правителя XII династии Аменемхета III и его заупокойный храм, названный греческими путешественниками Лабиринтом. На пространной территории некрополя, лежащего у подножия пирамиды, были обнаружены первые мумии с портретными изображениями, прикрепленными погребальными пеленами на месте лица умершего. Большинство фаюмских портретов были написаны на дощечках из кипариса или кедра размером приблизительно 35×30 см в технике энкастики, когда пигментированный горячий воск наносился специальным шпателем. Однако есть фаюмские

портреты, написанные в технике темперы. Материалом для портретов мог служить также лен, покрытый гипсом. Одно из найденных российскими археологами изображений было сделано на листе папируса.

Фаюмские портреты позволяют в буквальном смысле слова взглянуть в глаза людям, жившим почти две тысячи лет назад. После искусства амарнской эпохи, в котором живой человеческий дух, полный эмоций и противоречий, впервые с силой прорывается сквозь жесткие рамки канона египетского искусства, живопись фаюмских портретов вновь обращается к человеку, который предстает как индивидуальность, а не средоточие ▶



Антропологи могут провести полную реконструкцию внешнего облика человека по черепу

обобщенных черт, присущих тому или иному слою общества.

Считается, что на появление фаюмского портрета оказали влияние как римские, так и египетские религиозные представления. В римских домах вывешивались изображения умерших, включая посмертные маски, которые были исключительно памятными и не имели ритуальной функции. Они должны были напоминать о предках и свидетельствовать о родовитости семьи. В Египте же портрет умершего, прикрепленный к его мумии, имел важное функциональное значение. Очевидно, египтяне верили, что портрет, точно

передающий черты лица умершего, поможет душе найти покинутую ею плоть.

Во время раскопок Питри обнаружил рамки, в которые вставлялись портреты, висевшие на стене. Кроме того, археолог отметил, что многие из найденных им портретов были обрзаны, как он предположил, для того, чтобы соответствовать по размеру лицу мумии. Наконец, Питри нашел нескольких портретов, которые лежали не на лицах мумий, а рядом, в первоначальном обрамлении. Все это привело ученого к выводу, что портрет писался при жизни человека, а после его смерти передавался бальзамировщикам, которые вставляли его на место лица. Гипотеза Питри получила подтверждение после того, как на основе компьютерной томографии черепов нескольких умерших были сделаны трехмерные реконструкции их прижизненного облика, которые были сопоставлены с изображениями на портретах. Исследование показало, что существует безусловное сходство между умершим и его изображением, однако в ряде случаев погребенные были преклонного возраста, в то время как на соответствующих портретах были изображены молодые люди.

Хронология фаюмских портретов к настоящему времени разработана достаточно подробно и базируется,

прежде всего, на изменении стилей причесок и одежды изображенных людей в их сопоставлении с римскими скульптурными портретами и помпеянскими росписями. Женские портреты дают дополнительные критерии для датировки благодаря украшениям, мужские — благодаря стилю бород, который также менялся от эпохи к эпохе. На этом основании считается, что хронологические рамки существования фаюмского портрета простираются от времени правления императора Тиберия (14–37 гг. н.э.) до начала III в. н.э., времени правления императоров Каракаллы и Геты.

Сегодня в музеях мира хранится не менее 750 портретов, 300 из которых обнаружено в самом Фаюме. Исследования отечественных ученых внесли в сокровищницы науки новые знания об особенностях позднеегипетского погребального обряда.

### Прообраз глобализации

Картонаж, обнаруженный в захоронениях Дейр эль-Баната, содержит не только удивительно реалистичные портреты, но и ценные письменные документы, которые могут стать источником новых сведений об экономическом и социальном развитии Фаюмского оазиса греко-римской эпохи. В ближайшее время исследователи надеются с помощью метода расслоения живописного красочного слоя отделить тексты от рисунков. Как показали раскопки, в тот период (332 г. до н.э. – 395 г.) при погребении умершие оборачивались большим количеством погребальных пелен, на которые клали «оборотки» — папирусы, покрытые мелкими узорчатыми письменами на разных языках. Если расслоить «оборотки», они могут оказаться чем угодно: и обычными хозяйственными документами, и неизвестной трагедией Еврипида, и утерянным сочинением Манефона. Поскольку захоронения в основном производились в сухом песке, сохранявшем органику, египетские надписи, выполненные на природных материалах, дошли до нас неповрежденными. Поэтому львиная доля всех

### СПРАВКА

**Алексей Александрович Крол** — кандидат исторических наук, заместитель директора Центра египтологических исследований РАН, полевой директор археологической экспедиции в Дейр эль-Банате; участник российских археологических экспедиций в Мемфисе, подводно-археологических работ в Александрии; российско-голландских исследований в Телль Ибрагим Аваде, исследований царского тайника TT320, участник проекта «База данных восточноевропейской египтологии», автор многочисленных публикаций по истории и культуре древнего Египта.

рукописных свидетельств и папирусов греко-римского периода и даже более ранних времен происходит именно из Фаюма. Конечно, они не отражают в полной мере жизнь простых людей, поскольку в эпоху фараонов грамотным было лишь около 5% населения, а в греко-римскую — 7%, тем не менее, обнаруженные папирусы бесценны.

Надписи на «оборотках» были сделаны демотическим начертанием (демотика — народное письмо с упрощенным рисунком иероглифов, использовавшихся для фонетического письма), а также на греческом, арабском и арамейском языках, что подтверждает гипотезу, согласно которой Фаюмский оазис в греко-римский период был неким гигантским этническим культурным котлом, где зарождался уникальный вариант многонациональной общности, впитавший в себя наследие эллинистической традиции.

Фаюмский оазис на протяжении веков был центром могущественной цивилизации, возникшей на стыке величайших культур Востока — древнеегипетской, эллинистической, римской и восточного Средиземноморья. Возможно, то был прообраз нынешних глобализационных процессов, основанной на сплыве культур, идей и единой системе товарообмена.

Для Фаюмского оазиса огромное значение имела торговля, а она всегда интернациональна. В греко-римский период местные купцы бороздили просторы Средиземного моря и даже выходили в Индийский океан. А на раскопках древней столицы Египта — Мемфиса, расположенного недалеко от Фаюма, были обнаружены свидетельства тому, что здесь существовали поселения торгового люда из Индии и с Ближнего Востока, жили сирийцы, евреи, финикийцы, привозившие из заморских

стран не только диковинные товары, но и не менее своеобразные верования и традиции, обряды и культурные представления.

Взаимопроникновению культур в значительной степени способствовало завоевание Египта Александром Македонским, включившим его в состав своей многонациональной гигантской империи. Звероголовым богам земли фараонов пришлось потесниться и дать место не только греческим и римским небожителям, но и многочисленным мидийским, лидийским, малоазийским и прочим культам, а в конце концов смириться и с распространением учения Христа. Вероятно, они не мешали друг другу, поскольку археологические раскопки выявили наличие в пределах одних и тех же городов храмов и самых разных культовых построек, чьи прихожане сосуществовали в рамках единого социума.

Таким образом, глобализация, — это, скорее всего, не новомодное изобретение современных политиков и экономистов. Судя по всему, подобные процессы в той или иной степени характерны для любой исторической общности (даже самой древней), где сходятся интересы разных этносов. Они происходят на фоне культурного обособления, основанного, в первую очередь, на религиозных и национальных представлениях, но не противоречат ему. Возрождая далекое прошлое, археологи восстанавливают связь времен, и опять подтверждают: ничто не ново под солнцем и луной. В нынешних явлениях мы видим отблеск давно ушедших цивилизаций, а события современности заставляют с большим интересом вглядываться вглубь веков, надеясь увидеть там, как в зеркале, отражение самих себя и, возможно, найти ответы на вечные вопросы. ■

Тина Катаева



Разорванная грабителями в поисках драгоценностей мумия греко-римского времени

А. Кроп

Кип Ходжес

# КЛИМАТ И ЭВОЛЮЦИЯ ГОР



**Ш**есть лет назад я был на Тибете в верховьях реки Кали-Гандаки, бегущей в глубоком ущелье на юг к подножию Гималаев между вершинами Аннапурна и Дхаулагири. Местный фермер предложил мне отправиться в путешествие по плато на лошади. Днем, когда мы оказались в ущелье, вдруг поднялся ураганный ветер. Постуль скакуна становилось все медленнее, а затем он остановился и повернул назад, категорически отказавшись двигаться против ветра. Я спешился и стал тащить его за уздечку в долину. Наше противоборство продолжалось до тех пор, пока я не пришел к выводу, что, возможно, мой четвероногий спутник знает о погоде в Гималаях гораздо больше, чем я.

Ветры в Кали-Гандаки, одни из самых сильных на планете, достигают 20 м/с. и дуют почти каждый день. Они, равно как и холод, жара, дождь и снег, подобно скульпторам, формируют рельеф. Геологи давно изучают это взаимодействие, однако последние исследования открыли поистине глубокие связи между климатическими условиями и развитием горных систем. Лучшей иллюстрацией тому могут служить индийский муссон и Гималаи.

### Работа муссона

Индийский муссон возникает тогда, когда воздух над сушей нагревается быстрее, чем над Индийским океаном. У берегов Шри-Ланка часть юго-западных влажных ветров меняет направление на северное и проходит по южной и западной части Индии, а другая уходит на восток в Бенгальский залив (рис. на стр. 72).

Движущиеся в восточном направлении воздушные массы собирают дополнительную влагу в заливе, проливаясь тропическими ливнями на северо-восточном побережье Индии. Попадая в зону низкого давления, образующуюся на севере Индии у южных склонов гор, ураганы мчатся на север через Бангладеш и Индию, чтобы ударить по Гималаям. Затем они меняют курс

и движутся на запад. Тогда и начинается сезон дождей.

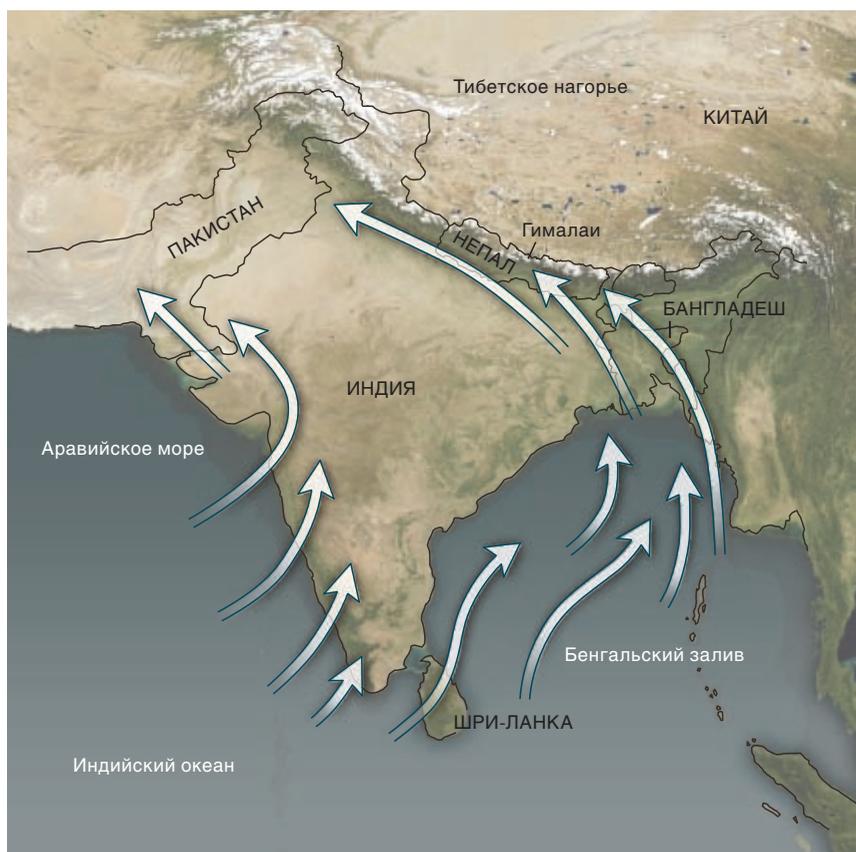
Метеостанции зафиксировали, что в Гималаях (особенно на высоте 1000–3500 м) за каждый дождливый период количество выпадающих осадков может превышать годовые нормы для большей части дождевых лесов Амазонки. Однако за хребтами Гималайских гор на Тибетском нагорье количество осадков незначительно. Безусловно, Гималаи, стоящие на страже Тибетского нагорья, влияют на климат всего региона. Климатические контрасты здесь поразительны: пройдя менее 200 км, можно пересечь тропические леса, альпийские луга и высокогорные пустыни. Но какие геологические процессы, происходящие в недрах Земли, влияют на возникновение и формирование горных систем?

### Горообразование

Тибетское нагорье и Гималайские горы вместе составляют так называемую Гималайско-Тибетскую орогенную систему (от греч. *oros* — гора и *genos* — рождение, происхождение). Здесь расположены 100 самых высоких вершин планеты. Величайшие горные цепи земного шара окружают регионы, где происходит или происходило столкновение литосферных плит, крупных жестких блоков верхней оболочки «твердой» Земли. Когда 45 млн. лет назад Индийская плита, дрейфующая в северном направлении от мезозойского субконтинента Гондвана, с силой надвинулась на Евразийскую плиту, на свет появились Гималаи. Сила инерции оказалась столь велика, что и по сей день Индийская плита продолжает свое движение со скоростью 4 см в год, непрерывно выдавливая часть Евразийской плиты.

В 70 гг. XX в., Поль Тапоньер (Paul Tarronnier) и Питер Молнар (Peter Molnar) из Массачусетского технологического института предположили, что были продавлены относительно жесткие блоки литосферы, отделенные один от другого кривыми разломами, идущими в восточном направлении к Юго-Восточной Азии. Столкновение плит вызвало также ▶

Новые исследования Гималаев и Тибета раскрывают взаимосвязь климата и тектоники



Большинство воздушных потоков (белые стрелки), идущих с Индийского океана, приносят летние муссонные дожди в Индию. Воздушные массы, проходящие над Бенгальским заливом, насыщаются влагой, в результате чего образуются тропические депрессии. Ураганы не могут перевалить через Гималаи, и в результате обрушиваются на землю с такой силой, что в некоторых местах ежемесячных осадков выпадает столько же, сколько за весь год в дождевых лесах Амазонки

сжатие и утолщение верхнего слоя литосферы. В среднем толща континентальной земной коры равна 30 км, а в горных регионах она может быть и больше. В Гималайско-Тибетской орогенной системе ее максимальная толщина составляет более 70 км. Связь между толщиной земной коры и высотой гор объясняется законом Архимеда: на тело, погруженное

в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной жидкости. Так, массивный айсберг больше возвышается над водой, чем небольшой, поскольку вытесняет более значительную массу морской воды. Также и Гималайско-Тибетская орогенная система поднялась выше над плотной мантией, чем соседние регионы с тонкой земной корой.

## ОБЗОР: КЛИМАТ, ГОРЫ И МУССОН

- Новые исследования свидетельствуют о том, что климатические явления влияют на геологическую активность и эволюцию горных систем.
- Климатически-геологическое взаимодействие доказывает, например, механизм обратной связи Гималайских гор и индийского муссона. Обильные дожди вызывают интенсивную эрозию южных склонов Гималаев, которая, согласно последним данным, может направить движение медленного устойчивого потока вещества из нижних слоев земной коры, находящихся под Тибетским нагорьем, к поверхности передовых хребтов, которые стали мощным заслоном на пути муссонов.

## Потоки энергии и горообразование

Исследователи объясняют причину рождения гор столкновением плит, а эволюцию горных систем связывают с процессами энергообмена. С точки зрения физики, орогенная система сродни водохранилищу гидроэлектростанции. Перегораживая реку, дамба позволяет превратить кинетическую энергию потока воды в потенциальную энергию которого оказывается гораздо выше уровня реки ниже по течению. Водохранилище может быстро растратить избыток потенциальной энергии в попытке восстановить равновесие с окружающей средой. В этом случае, если дамба не очень прочная, может произойти прорыв. Расширение Гималайско-Тибетской системы также связано с необходимостью сбросить избыток потенциальной энергии, возникающей из-за разницы между толщиной земной коры под ней и окружающей низменной территорией.

Верхние слои жесткой земной коры разделены на блоки крупными разломами. На нижних уровнях, где температура и давление значительно выше, горные породы, как зубная паста, выдавливаются по каналам. Теоретические и полевые исследования свидетельствуют о том, что каналы с вязким текучим веществом земной коры могут существовать миллионы лет. Если у них появится возможность растратить избыток потенциальной энергии, то вещество, заполняющее их, медленно растечется. Мэрин Кларк (Marin Clark) и Лей Ройден (Leigh Royden) из Массачусетского технологического института предположили, что слабый устойчивый наклон, идущий от Тибетского нагорья на юго-восток, возник в результате растекания вещества нижних слоев земной коры за пределы восточной границы нагорья (рис. на стр. 73 внизу). Дальнейшие исследования подтвердили, что вещество нижних слоев земной коры под Тибетом разливается также в южном направлении в сторону Гималаев. Подобно воде в водохра-

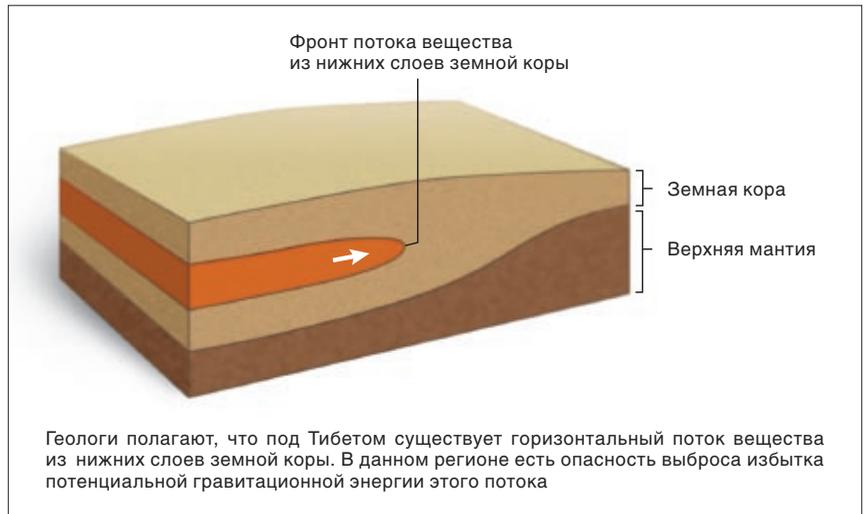
нилище, стремящейся к любой бреши в плотине, расплавленный материал устремляется прежде всего в направлении наименьшего сопротивления, где процесс поверхностной эрозии, вызванной муссонными дождями, наиболее активен.

### Системы разрывов

Большинство крупных разрывных движений в горных районах проявляется в форме надвигов, образующихся при столкновении литосферных плит. Тот, кто убирал лопатой снег, представляет, как его корка растрескивается и тонкие пластины снега ложатся одна на другую, аналогично надвигам. На вертикальном разрезе Гималайских гор с севера на юг показана структура разрывных нарушений: главные центральный, пограничный и фронтальный надвиги сходятся на глубине, образуя так называемый Гималайский подошвенный надвиг (рис. на стр. 74). Породы, расположенные выше их, движутся в южном направлении относительно материала нижних слоев.

Двадцать лет назад группа исследователей из Массачусетского технологического института выделила еще одну систему разрывных нарушений в Гималаях, что коренным образом изменило наши представления о горообразовании при столкновении литосферных плит. Южно-Тибетская система разрывных нарушений, лежащая вблизи Гималайского хребта, в геометрическом плане схожа с гималайской, но вышележащие породы здесь сдвинуты в противоположном, северном направлении.

Подобные системы разрывов характерны для зон тонкой растягивающейся земной коры, например, срединных океанических хребтов, территории между горами Сьерра-Невада и плато Колорадо. Однако их происхождение не связывалось с зонами столкновения плит, пока не была открыта Южно-Тибетская система разрывов. Пытаясь соединить знания о ней с тектогенезом всей Гималайско-Тибетской системы, мы пришли к заключению, что



пластичный материал земной коры постоянно поступает к передовым хребтам Гималаев. Между главным фронтальным надвигом и Южно-Тибетской системой разрывов, особенно над главным центральным надвигом, материал движется к югу по отношению, к породам, лежащим как выше Южно-Тибетских разрывов,

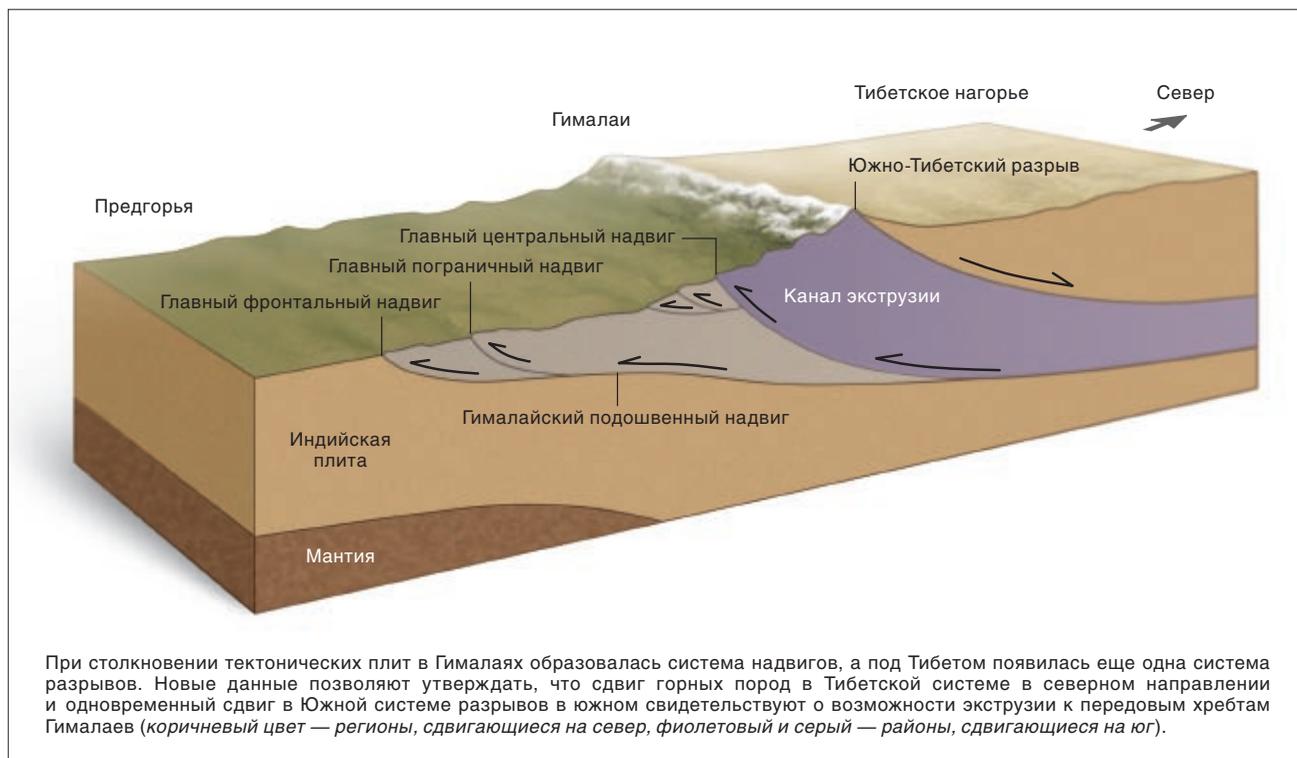
так и ниже Гималайского подошвенного надвига. Предполагается, что южная зона выдавливания сформирована потоком вязкого вещества нижних, прокладывающего путь к поверхности Земли.

В раннем миоцене (16–22 млн. лет назад) Южно-Тибетская система разрывов и главный центральный ▶



Потоки вещества земной коры (оранжевые стрелки на космическом снимке) не достигают поверхности Земли, а в местах их прохождения образуются вздутия земной коры (вертикальный разрез на диаграмме вверху). В районах обильных муссонных дождей, вызывающих сильную эрозию (фиолетовые стрелки), каналы земной коры могут быть вскрыты (вертикальный разрез на стр. 74)

JEN CHRISTIANSEN, SOURCE: "A SYNTHESIS OF THE CHANNEL FLOW-EXTRUSION HYPOTHESIS AS DEVELOPED FOR THE HIMALAYAN-TIBETAN OROGENIC SYSTEM" BY KY. HODGES, JEN CHRISTIANSEN, AND J. D. COOPER, "CHANNEL FLOW-EXTRUSION: A SYNTHESIS OF THE CHANNEL FLOW-EXTRUSION HYPOTHESIS AS DEVELOPED FOR THE HIMALAYAN-TIBETAN OROGENIC SYSTEM", SOURCE: JEN CHRISTIANSEN, LONDON (IN PRESS); SOURCE: KY. HODGES, THE VISIBLE EARTH (2003)



надвиг были достаточно активны. В конце 80-х гг. XX в. Кларк Барчфил (Clark Burchfiel), Лей Ройден из Массачусетского технологического института и я предложили простую модель экстррузии, продемонстрировав, что управляемый сдвиг в системе разрывных нарушений в раннем миоцене привел к движению потока пород в южном направлении между двумя системами разрывов. По нашему мнению, данный процесс был вызван разностью давления между поднимающимся Тибетским нагорьем и Индией.

Затем несколько групп исследователей усовершенствовали нашу модель. Наконец, Дуглас Нельсон

**ОБ АВТОРЕ**

**Кип Ходжес** (Kip Hodges) — профессор Массачусетского технологического института. Большинство его работ посвящено Гималаям и Тибету. Он также проводил тектонические исследования в Скандинавии, в приполярной восточной Гренландии, Ирландии, на западе США, Калифорнии и перуанских Андах.

(Douglas Nelson) из Сиракьюсского университета высказал предположение, что, вероятно, текучие вещества нижнего слоя земной коры существовали под Тибетом с раннего миоцена, и что горные породы, выходящие сейчас на поверхность Земли между южной частью Тибета и главным центральным надвигом, могут представлять собой затвердевшие пластичные породы, выдавленные к поверхности Земли.

На большинстве моделей экстррузии (рис. вверху) показана эволюция Гималайско-Тибетской системы в миоцене, но, возможно, процесс вытеснения продолжается и по сей день. Для лучшего понимания тектонических движений Гималайской горной системы, несколько групп ученых использовали геологический хронометр, позволивший зафиксировать радиоактивный распад элементов, содержащихся в минералах, которые кристаллизовались во время разрывных движений. В результате было установлено, что разрывы образовывались в течение последних 20 млн. лет около тех мест, где расположен главный центральный надвиг и Южно-Тибетская

система. А в последние несколько тысяч лет структурные образования, ограничивающие границы канала экстррузии, были активны на территории Непала.

**Экстррузия и эволюция ландшафта**

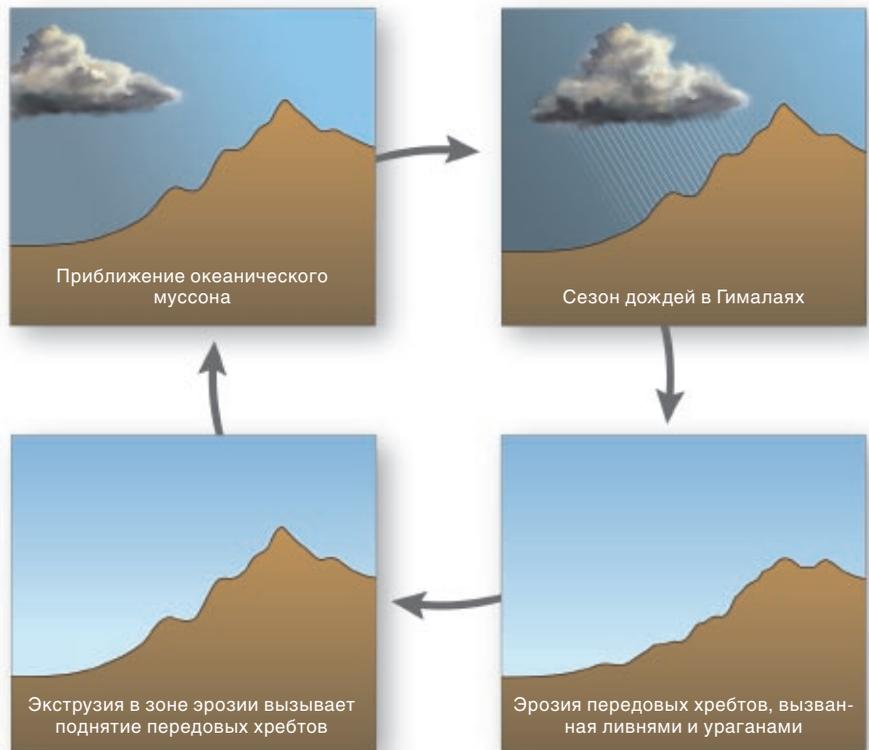
Если экстррузия играла важную роль в формировании Гималаев, то должны существовать свидетельства быстрого поднятия поверхности Земли между системами разрывных нарушений. Такими признаками могут служить высокие берега рек, текущих в зоне предположительной экстррузии, и крутые горные склоны. Измерения, проведенные за последние 30 лет, показали, что территория поднимается со скоростью несколько миллиметров в год по отношению к расположенной над главным центральным надвигом.

Один из наиболее надежных способов расчета скорости эрозии в орогенных системах основан на естественном продуцировании космогенных нуклидов (изотопы, образующиеся под действием космических лучей) на поверхности горных пород, обнаженной в резуль-

JEN CHRISTENSEN, SOURCE: "SOUTHWARD EXTRUSION OF TIBETAN CRUST AND ITS EFFECT ON HIMALAYAN TECTONICS," BY K.V. HODGES, J.M. HURTADO AND K.X. WHIPPLE, IN TECTONICS, VOL. 20, NO. 6, PAGES 799-809, 2001

тате эрозии, вызванной муссонными дождями. Концентрация таких нуклидов, как бериллий-10 и алюминий-26, в образцах горных пород пропорциональна времени, отсчитываемому с тех пор, как пласты пород вышли на поверхность. Кэмерон Вобус (Cameron Wobus), Келин Уиппл (Kelin Whipple) из Массачусетского технологического института, Арджун Хеймсах (Arjun Heim-sath) из Дартмутского колледжа и я использовали эту методику в Центральном Непале. Было определено, что ускорение эрозии в зоне предполагаемой экстррузии происходило в три раза быстрее, чем на территории, расположенной южнее. Используя термохронометр для образцов, собранных в Гималаях в центральном Непале, Анн Блис (Ann Blythe) из Университета Южной Калифорнии и Кейт Хантингтон (Kate Huntington) из Массачусетского института выяснили, что эрозия усиливалась в зоне предполагаемой экстррузии, по крайней мере, в течение последних нескольких миллионов лет. Совокупные данные методов исследования ландшафта, космогенных нуклидов и термохронометрии подтверждают гипотезу, согласно которой значительное поднятие поверхности Земли происходило в течение длительного периода.

Известно, что вода и лед способствуют развитию физической эрозии. Следовательно, повышенное количество осадков, характерное для муссонных областей, должно привести к усилению эрозии вдоль передовых хребтов Гималаев. Если существует обратная связь между этой эрозией и южной зоной экстррузии вещества земной коры, то район большого выпадения осадков должен подвергаться устойчивому поднятию. Согласно расчетам распределения осадков было установлено, что наибольшее количество дождей выпадает как раз в области быстрой эрозии и поднятия земной коры. Таким образом, регион с большим количеством муссонных осадков соответствует зоне предполагаемой экстррузии, вызванной эрозией передовых хребтов при прохождении



На схеме показана взаимосвязь индийского муссона и формирования Гималайских гор. Летний муссон, встречая на своем пути на север мощное препятствие — Гималайские горы, — проливается обильными дождями. Эрозия облегчает экстррузию вязкого материала из нижних слоев земной коры в сторону передовых хребтов, поддерживая рост крутых склонов передовых хребтов, а процесс выдавливания способствует снижению муссонных осадков

Индийского муссона, но экстррузия, активизированная интенсивной эрозией, создает в действительности заслон прохождению муссонов на север. При этом обильные осадки вдоль передовых хребтов усиливают эрозию, которая, в свою очередь, приводит в действие экстррузию, и цепь замыкается.

В основе нашей новой концепции лежит выявленная обратная связь климатических и геологических процессов, вызывающих нарушения в природе. Теоретическое моделирование подтверждает наличие подобной взаимосвязи в эволюции орогенных систем. ■

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Himalayan Tectonics Explained by Extrusion of a Low-Viscosity Crustal Channel Coupled to Focused Surface Denudation. C. Beaumont et al. in *Nature*, Vol. 414, pages 738–742; December 13, 2001.
- Southward Extrusion of Tibetan Crust and Its Effect on Himalayan Tectonics. K.V. Hodges et al. in *Tectonics*, Vol. 20, No. 6, pages 799–809; 2001.
- Has Focused Denudation Sustained Active Thrusting at the Himalayan Topographic Front? Cameron W. Wobus et al. in *Geology*, Vol. 31, No. 10, pages 861–864; October 2003.
- Monitoring the Monsoon in the Himalayas: Observations in Central Nepal, June 2001. Ana P. Barros and Timothy J. Lang in *Monthly Weather Review*, Vol. 131, No. 7, pages 1408–1427; 2003.
- Quaternary Deformation, River Steepening, and Heavy Precipitation at the Front of the Higher Himalayan Ranges. Kip V. Hodges et al. in *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 220, pages 379–389; 2004

# ДВИГАТЕЛЬ БУДУЩЕГО

Владимир Скибин

## Разработка интегрированных силовых установок для гиперзвуковых транспортных систем с высокой топливной эффективностью

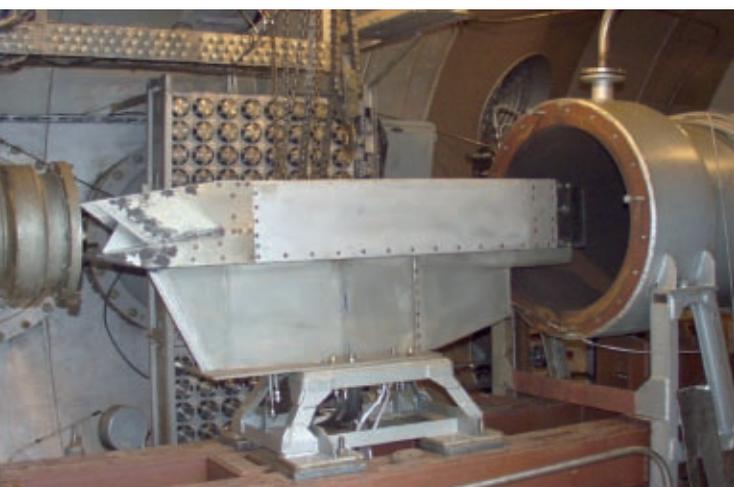
Повысить скорость передвижения транспортных систем в атмосфере, создать системы выведения нового поколения невозможно без освоения гиперзвуковых скоростей полета и использования воздушно-реактивных двигателей (ВРД). Активные гиперзвуковые летательные аппараты (ГЛА), способные совершать как разгон, так и длительный крейсерский полет, — передовые образцы авиационно-космической техники. В настоящее время в мире растет интерес к освоению активных гиперзвуковых полетов в атмосфере. Главная проблема — создать двигатели, имеющие большую экономичность, чем ракетные. Согласно оценкам, высокоскоростной прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД) для гиперзвуковых скоростей полета (ГПВРД) наиболее экономичен для силовых установок перспективных ГЛА различных классов, предназначенных для решения задач высокоскоростной транспортной авиации и дальнейшего освоения космического пространства.

Однако, несмотря на более чем пятидесятилетнюю историю исследований, реальная тяговая эффективность ГПВРД, интегрированного с летательным аппаратом, и его состоятельность в качестве нового типа двигателей

для перспективных летательных аппаратов различного назначения пока еще требуют экспериментального подтверждения. ГПВРД свойствен высокий уровень интеграции двигателя с планером ГЛА. Это в значительной степени отличает высокоскоростные прямоточные ВРД для гиперзвуковых скоростей полета от других типов воздушно-реактивных двигателей. Практически весь фюзеляж гиперзвукового летательного аппарата рассматривается как силовая установка, что в значительной мере сказывается на тягово-экономических характеристиках ГПВРД и, в первую очередь, на эффективной тяге, непосредственно используемой для движения летательного аппарата. Данные об эффективной тяге ГПВРД при фиксированных числах Маха могут быть получены на Земле в процессе высотных стендовых испытаний двигателя-демонстратора, интегрированного с фюзеляжем экспериментального ГЛА. Состоятельность же ГПВРД в качестве нового типа двигателей может быть подтверждена только в условиях реального гиперзвукового полета летательного аппарата.

## Насущные проблемы

В ГПВРД нет ни компрессора, ни турбины, а необходимое повышение давления в камере сгорания (и перед соплом) осуществляется только за счет скоростного потока набегающего потока. Основные задачи, которые необходимо решить при создании высокоскоростных прямоточных ВРД, — это обеспечение эффективного сгорания топлива, в том числе, при сверхзвуковых скоростях потока, а также обеспечение охлаждения конструкции камеры сгорания, рабочая температура в которой достигает 3000 °С и выше. Полная температура воздуха, поступающего в двигатель, выше 1000 °С, что не позволяет использовать воздух для охлаждения камеры сгорания, как в ВРД других типов. Топливо после охлаждения теплонеприжатых конструкций должно поступать в задаваемых пропорциях в проточный тракт. Очевидно, что система охлаждения должна быть сбалансирована с геометрическими размерами (омываемой поверхностью) камеры сгорания. Для создания необходимого в полете уровня тяги рабочий процесс должен быть достаточно эффективным, что подразумевает высокие характеристики процессов смешения и горения в высокоскоростных потоках, топливную эффективность, надежную



Экспериментальный модуль для ГЛЛ ВК в термобарокамере высотного стенда Ц16ВК

стабилизацию горения в условиях, пока не встречавшихся в технике. Для обеспечения работоспособности теплонапряженных элементов конструкции двигателя и, в первую очередь, камеры сгорания необходимо использовать новые высокотемпературные материалы и покрытия. При высоком уровне интеграции двигателя и летательного аппарата необходимо создать оптимальные характеристики входного устройства и сопла с участком внешнего расширения. Это требует новых решений с применением соответствующих технологий пространственного трехмерного компьютерного моделирования и экспериментов на гиперзвуковых стендах и гиперзвуковых летающих лабораториях (ГЛЛ).

Комплекс исследований по разработке интегрированных силовых установок для гиперзвуковых транспортных систем с высокой топливной эффективностью ведется в рамках Федеральной целевой научно-технической программы (ФЦНТП) «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002–2006 гг.» группой институтов во главе с Центральным институтом авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (ЦИАМ им. П.И. Баранова). В основе проекта лежат фундаментальные численные и экспериментальные исследования физико-химических процессов, реализующихся в проточном тракте ГПВРД. Так, в процессе выполнения исследований разработаны детальные и редуцированные схемы химической кинетики для горения углеводородного топлива в высокоскоростных потоках. С использованием детальной схемы химической кинетики рассмотрен процесс термодеструкции топлива в системе охлаждения и проанализировано влияние изменения химического состава топливной струи на воспламенение в сверхзвуковом воздушном потоке. Проведенные расчетно-экспериментальные исследования структуры высокоскоростных течений в каналах с химическими реакциями, способствующие пониманию фундаментальных аспектов смешения, воспламенения, горения, аэротермохимии (равновесность, диссоциация, замороженность), позволили приступить к разработке проекта и созданию для наземных стендовых испытаний демонстрационной модели с входным устройством внутреннего сжатия, камерой сгорания и начальным участком сопла внутреннего расширения. При разработке проекта также использовались опыт и конструкторские решения, применявшиеся при создании экспериментального модуля для ГЛЛ-ВК.

Спроектированная в России в середине 1990-х гг. ГЛЛ-ВК по своим целям и заложенным характеристикам превосходила зарубежные аналоги. В Летно-исследовательском институте имени М.М. Громова был сделан полноразмерный макет ГЛЛ-ВК, предназначенный для проведения макетно-конструкторских испытаний. Данный макет неоднократно демонстрировался на Международном авиационно-космическом салоне в г. Жуковском. Несмотря на высокий уровень проработки возможности проведения летных исследований с использованием ГЛЛ-ВК, направленных на получение новых



Полноразмерный макет ГЛЛ ВК

фундаментальных знаний об аэротермохимических и газодинамических процессах, связанных с интеграцией летательного аппарата и двигателя при гиперзвуковых скоростях полета, из-за отсутствия финансирования данный проект ГЛЛ заморожен.

### ГПВРД-демонстратор

В рамках работ по проекту ФЦНТП планируются разработка, создание и испытания ГПВРД-демонстратора. Конечной целью проекта должно быть проведение автономных летных испытаний модельного ГПВРД с демонстрацией эффективной тяги — активный полет ГЛЛ после отделения от ускорителя. Для выполнения этой задачи модельный ГПВРД должен проработать в полете продолжительное время — более ста секунд. На небольшом летательном аппарате возможности размещения топлива весьма ограничены. Поэтому невозможно использовать жидкий водород, который, вероятно, будет типичным для ГПВРД космического назначения. Предполагается использование жидкого углеводородного топлива, обычного для авиации или ракетной техники. Тип топлива будет определен в процессе выполнения проекта исходя из условий приемлемых тяговых характеристик, возможности охлаждения конструкции и эксплуатационных ограничений.

Ясно, что интегрированный ГПВРД-демонстратор не может быть разработан отдельно от ГЛА-демонстратора. Необходимо провести определение концепции основных летных характеристик, размеров и других параметров, необходимых для разработки конструкции силовой установки на базе ГПВРД-демонстратора. До проведения летных испытаний ГПВРД-демонстратора следует ▶



Гиперзвуковой высотный стенд Ц16ВК

выполнить большое количество экспериментальных исследований на наземных стендах, как на двигательных гиперзвуковых высотных стендах, так и в аэродинамических трубах. Экспериментальная база ЦИАМ обеспечивает проведение широкого комплекса исследований и разработок в области проблемных вопросов гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей. Стенд Ц16ВК позволяет проводить наземные испытания двигателя в свободном потоке и испытания камер сгорания на присоединенном воздухопроводе в широком диапазоне чисел Маха полета для любого топлива, которое используется сегодня в ракетных и авиационных двигателях, включая криогенные. Этот стенд является крупнейшим в Европе. Энергетика НИЦ ЦИАМ позволяет проводить на стенде Ц16ВК с использованием аэродинамических сопел, диаметр выходного сечения которых — более одного метра, высотные испытания моделей ГПВРД, интегрированного с фюзеляжем гиперзвукового летательного аппарата.

Стенд Ц16ВК — это гиперзвуковой высотный стенд периодического действия, позволяющий проводить испытания исследуемого объекта с выходом его параметров на стационарный режим по тепловым процессам. Проведение испытаний на таком стенде дает возможность моделировать реальные рабочие процессы в камерах сгорания (стационарный теплоотвод в стенки камеры сгорания), процессы в стационарных пограничных слоях и рециркуляционных зонах около горячих стенок. Продолжительность работы стенда Ц16ВК регламентируется тепловым состоянием исследуемого объекта и запасом компонентов (объемом и давлением в баллонных рампах), и может составлять более ста секунд. Разрежение (до 0,005 бар) во время проведения испытаний в рабочей части стенда (термобарокамере, выполненной в виде герметичной камеры Эйфеля) обеспечивается работой эксгаустерных машин высотно-компрессорной станции НИЦ ЦИАМ. Высокие параметры торможения окислительной смеси, имитирующей воздух по массовой

доле кислорода, обеспечиваются работой огневого подогревателя воздуха. Высотные испытания на стенде Ц16ВК — наиболее сложные из всех типов испытаний, проводимых в НИЦ ЦИАМ.

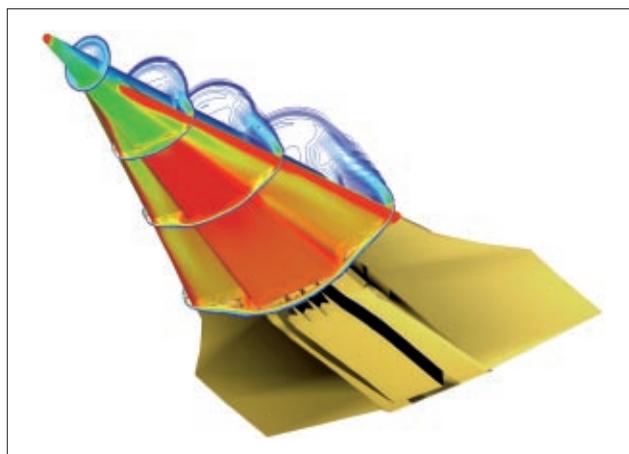
Создание экспериментального ГЛА с ГПВРД-демонстратором, который способен разогнаться, требует разработки новых технологий в решении проблемы интеграции двигателя и летательного аппарата. Помимо экспериментальных исследований в аэродинамических трубах проводятся расчетно-теоретические исследования аэродинамических характеристик гиперзвукового летательного аппарата, интегрированного с двигателем.

### Ближайшие перспективы

Создание стендового варианта ГПВРД-демонстратора, разработка экспериментального ГЛА с модельным ГПВРД или, другими словами, гиперзвуковой летающей лаборатории (ГЛЛ) для демонстрации активного полета, проведение стендовых и летных испытаний интегрированного комплекса — сложная задача, требующая развития кадрового потенциала предприятий, преемственности поколений специалистов. Сегодня, к сожалению, не существует тех опорных технологий, на базе которых можно было бы в короткие сроки создавать реальные образцы высокоскоростных прямоточных ВРД для ГЛА. Фундаментальные экспериментальные исследования физико-химических процессов, которые могут быть реализованы в проточном тракте ГПВРД, проводились на малоразмерных неохлаждаемых моделях и не могут быть в достаточном объеме использованы при разработке предполагаемых реальных ГПВРД больших размеров.

Критические технологии, обеспечивающие создание высокоскоростных прямоточных ВРД для ГЛА на уровне передовых достижений в этой области, можно представить следующим образом.

1. Технологии проектирования проточного тракта двигателя при высоком уровне его интеграции с гиперзвуковым летательным аппаратом.



Использование методов вычислительной аэродинамики в исследованиях проблем интеграции двигателя и летательного аппарата



Предполагаемый полет ГЛЛ ВК с работающим двигателем демонстратором

2. Технологии эффективного сгорания топлива (с учетом негативных процессов диссоциации) и управления рабочим процессом в высокоскоростных камерах сгорания.

3. Технологии охлаждения топливом высокотемпературных камер сгорания воздушно-реактивных двигателей с учетом реальных свойств топлива-хладагента и изменения его агрегатного состояния.

4. Технологии создания новых конструкций элементов и узлов двигателя на основе высокотемпературных материалов и покрытий, способных выдерживать необходимое время тепловые нагрузки в проточном тракте ВРД в условиях, ранее не встречавшихся в технике.

5. Технологии проведения стендовых и летных испытаний демонстраторов ВРД, интегрированных с летательным аппаратом, для определения характеристик двигателя в реальных условиях эксплуатации, подтверждающих его работоспособность.

Только на основе разработанных и освоенных критических технологий можно создавать образцы эффективных высокоскоростных прямоточных ВРД для гиперзвуковых ГЛА различного назначения.

Рассмотрение возможных проектов применений ГЛА с ГПВРД в качестве силовой установки показывает, что в основе разработки силовых установок для этих ГЛА лежит создание демонстратора ГПВРД, на котором должен быть выполнен комплекс фундаментальных исследований для выяснения заложенных характеристик принципиального характера. Результаты, которые будут получены в ходе проведения испытаний демонстраторов ГПВРД, интегрированных с ГЛА, позволят в относительно короткие сроки создавать реальные двигатели для различных типов ГЛА. Разработка перспективных ГПВРД открывает ряд направлений научно-технических работ (НТР), которые позволят достигнуть экстремальных характеристик воздушно-реактивных двигателей. Разработка полноразмерных гиперзвуковых прямоточных ВРД для натурных ГЛА обеспечит рост научно-технического потенциала России. Техническая реализация ГПВРД возможна только при использовании новейших

технологий производства, нетрадиционных конструктивных материалов, соответствующей стендовой базы для испытаний и расчетных методов в процессе проектирования и интерпретации результатов испытаний.

ГПВРД — двигатель будущего. Сейчас необходимо доказать состоятельность ГПВРД как двигателя, т.е. продемонстрировать эффективную тягу в условиях автономного реального полета летательного аппарата.

ГЛА, интегрированные с ГПВРД, способные совершать активные гиперзвуковые полеты, станут образцами авиационно-космической техники XXI в. и позволят приступить к активному использованию области гиперзвуковых скоростей полета с числами Маха  $M_p=5-15$  в диапазоне высот  $H=18-45$  км летательными аппаратами следующих типов:

- гиперзвуковые летательные аппараты со скоростью полета 4800–7600 км/ч ( $M_p=4,5-7$ ) на высоте до 36 км;
- трансконтинентальные гиперзвуковые самолеты с глобальной дальностью полета и крейсерской скоростью свыше 8000–11000 км/ч;
- многоразовые космические транспортные системы, выводящие на околоземную орбиту высотой 200 км полезную нагрузку массой 5–8 т (старт с существующих аэродромов обеспечивает принципиально новую технику вывода на орбиты любого наклона без космодромов и отчуждаемых территорий, с соответствующим сокращением стоимости в 5–10 раз). ■

#### ОБ АВТОРАХ

**Владимир Алексеевич Скибин** — профессор, доктор технических наук, Генеральный директор Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»).

**Александр Николаевич Прохоров** — кандидат технических наук, начальник отдела аэрокосмических двигателей ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

# ФЕРМЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ

## И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЦИКЛОДЕКСТРИНОВ

Людмила Иванова

**Получение циклодекстринов — новое и активно развивающееся направление биотехнологии, основанное на микробиологических, химических и биохимических процессах**

Циклодекстрины (ЦД) относятся к макроциклическим соединениям углеводной природы, получаемым путем воздействия на крахмал некоторых специфических ферментов микробного происхождения, объединенных под названием циклодекстринглюканотрансферазы (ЦГТ-азы) и способных образовывать комплексы включения типа «хозяин-гость». Благодаря уникальным свойствам спектр применения ЦД постоянно расширяется: от использования их для улучшения качества и длительности хранения пищевой продукции, снижения побочных эффектов лекарственных препаратов, и до очистки воздуха, почв и вод от загрязняющих ядовитых веществ. Этим объясняется постоянный рост интереса к ним представителей фундаментальной науки и крупного бизнеса во всем мире.

ЦД представляют полимергомологический ряд с общей формулой  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , а также его производные. Общие для них — наличие характерного циклодекстринового макроцикла, структурной единицей которого является  $\alpha$ -D-глюкоза в пиранозной форме, имеющая конформацию кресла  $C_1$  (рис. 1). Структурные формулы и компьютерные модели молекул трех первых членов этого гомологического ряда, представляющих собой фрагменты цепей крахмала, свернутые в компактные кольца, показаны на рис. 2. ЦД со степенью полимеризации меньше 6 по стерическим причинам невозможны. Наибольший практический интерес представляют три первых возможных гомолога с  $n=6,7,8$ , которые обладают

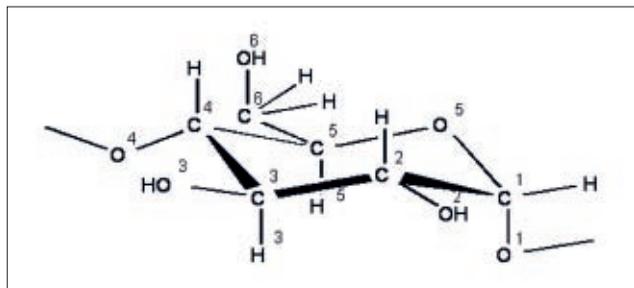


Рис. 1. Остаток  $\alpha$ -D-глюкопиранозы в конформации кресла  $C_1$

фиксированной конформацией и соответственно осевой симметрией. Высшие члены гомологического ряда ЦД с  $n$  больше 8 также известны, но практического интереса не представляют.

В настоящее время ЦД принято обозначать буквами греческого алфавита в сторону увеличения длины кольца:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и т.д.

### Основные феноменологические свойства циклодекстринов

К особым феноменологическим свойствам ЦД относят то, что, в отличие от линейных декстринов, ЦД хорошо кристаллизуются из воды и водно-спиртовых растворов. Гликозидные связи в ЦД более стабильны, чем в линейных декстринах. ЦД нетоксичны и практически не имеют вкуса.

Наиболее интересное и практически значимое свойство ЦД — способность образовывать комплексы включения типа «хозяин-гость». Согласно принятому в литературе образному обозначению в данном случае «хозяином» называют молекулы ЦД с внутренней гидрофобной полостью, а «гостем» — молекулу, которая входит в эту полость и задерживается там за счет межмолекулярных сил (рис. 3).

В случае образования комплексов включения физические и химические свойства «гостей» могут значительно изменяться, что позволяет улучшать прикладные свойства образующих комплекс веществ. Достигаются такие позитивные эффекты, как увеличение растворимости в воде неполярных субстанций (10–100 раз); уменьшение летучести легко испаряющихся органических жидкостей; увеличение стабильности ингредиентов к воздействию кислорода, воздуха, света, температуры; пролонгирование действия активного начала, устранение или снижение побочных эффектов компонентов, таких как неприятный запах или вкус и многое другое.

Благодаря перечисленным особенностям сферы применения ЦД постоянно расширяются. ЦД и комплексы на их основе находят применение в самых разнообразных областях народного хозяйства: в пищевой промышленности, в медицине и ветеринарии, в парфюмерии и косметологии, в сельском хозяйстве, биотехнологии и экологии, в области химических и других технологий, в нефтедобыче.

## Продуценты циклодекстринглюканотрансфераз

Большая часть известных бактерий, имеющих отношение к образованию ЦД, принадлежит к разряду типичных обитателей почв. В природе реакция происходит вне микробных клеток, под действием фермента ЦГТ-азы, катализирующего трансформацию остатков растительного крахмала в почве.

Способностью выделять в окружающую среду ЦГТ-азу обладают лишь прокариоты, у микроскопических грибов и высших организмов данный фермент не обнаружен. Да и бактерии (носители гена ЦГТ-азы) встречаются довольно редко и могут быть найдены лишь случайно или с использованием специальных методик скрининга.

Типичной  $\alpha$ -ЦГТ-азой является фермент из *Paenibacillus macerans* и *Klebsiella pneumoniae*. Для алкалофильных форм бацилл, таких как *B.circulans* var. *alkalophilus*, *B.firmus alkalophilus*, *B.lentus*, *B.agaradhaerens* и др., а также аэробных спорообразующих бактерий, причисляемых к категории *B.circulans*, свойственны ферменты, циклизующие субстрат преимущественно в  $\beta$ -ЦД, с образованием сравнительно небольших примесей  $\alpha$ - и  $\gamma$ -гомологов.

Среди термотолерантных циклодекстриногенов следует отметить *B.stearothermophilus* (с 2001 г. они отнесены к роду *Geobacillus*); *Thermoactinomyces* sp., *Thermoactinomyces thermosulfurigenes* и др.

Существенный практический и теоретический интерес представляют пока еще мало изученные штаммы с циклодекстриногенной активностью, такие как *Micrococcus* sp., *M.luteus*; *Brevibacterium* sp. 9605; *Clostridium thermohydroamylolyticum* ATCC 39252, ATCC 53016;

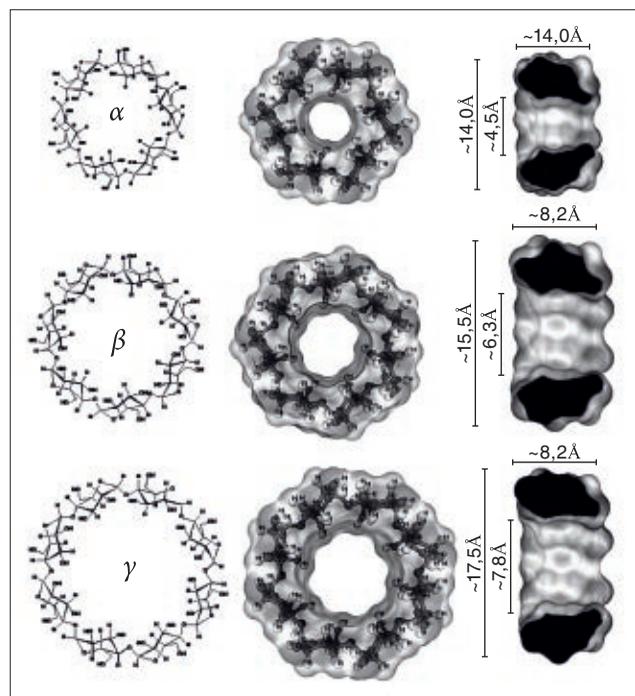


Рис. 2. Структурные формулы ЦД и компьютерные модели их молекул

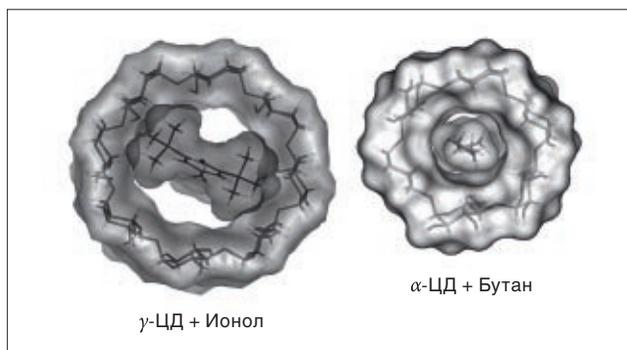


Рис. 3. Примеры соответствия молекул «гостей» и размеров полости ЦД

архей-гипертермофил *Thermococcus* sp. B001; *Pseudomonas* sp. NRRL B-18375 и др.

Пока известно ограниченное количество активных продуцентов ЦГТ-аз, поэтому работы по скринингу и оптимизации условий культивирования циклодекстриногенных штаммов очень перспективны.

## Получение циклодекстринов

Несмотря на то, что для выделения и очистки каждого гомолога циклодекстринового ряда ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и др. ЦД) требуются различные подходы, основные этапы получения ЦД схожи. Они заключаются в следующем: культивирование продуцентов ЦГТ-азы, выделение фермента; получение препаратов ЦГТ-азы заданной степени очистки; предобработка субстрата (крахмала) ферментативными методами; ферментативный катализ с использованием ЦГТ-азы — реакция конверсии крахмала с образованием смеси ЦД; разделение, выделение и очистка одного из гомологов ЦД.

Скрининг и работа над селекцией штаммов-продуцентов ЦГТ-аз, оптимизация условий их культивирования, так же, как и вопросы повышения эффективности конверсии крахмала и степени очистки готовых циклических продуктов по-прежнему остаются наиболее важными в работе по улучшению технико-экономических показателей производства ЦД.

В настоящее время химический синтез ЦД возможен, но очень дорог. Для производства ЦД в промышленных масштабах остается лишь один способ — биотехнологический с применением ЦГТ-аз. При этом используются два технологических подхода: неконтролируемый (или бессольVENTный), в ходе которого в биохимический реактор вводятся лишь ЦГТ-аза и раствор крахмала, и контролируемый (или сольVENTный), когда в реакционную смесь добавляется еще и комплексообразователь — органическое или неорганическое соединение (сольVENT), образующее комплекс включения с одним из циклических гомологов, в результате чего возрастает его выход (рис. 4). При бессольVENTном способе конверсии реальный выход  $\beta$ -ЦД по отношению к кукурузному крахмалу обычно составляет 20–35%; в альтернативной технологии конверсия увеличивается до 70–85%. Однако, ▶

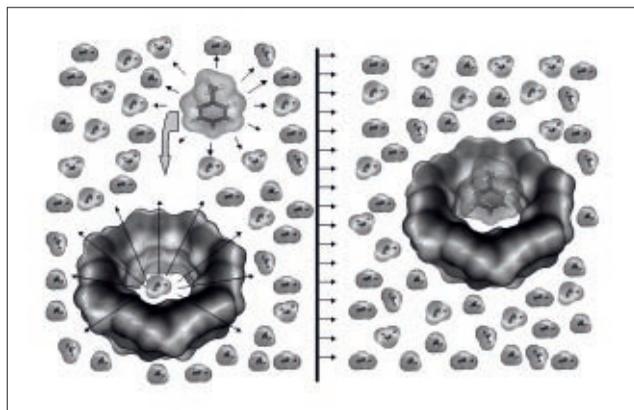


Рис. 4. Образование комплекса β-ЦД и толуола в воде

«бессольвентный» ЦД не содержит микропримесей растворителей и может быть использован в пищевой промышленности без дополнительной очистки. Поэтому поиск, разработка и использование новых нетоксичных комплексообразователей, легко удаляемых дистилляцией, и альтернативных широко используемому толуолу и его аналогам, служит одним из наиболее перспективных путей оптимизации биотехнологии ЦД.

Основное производство ЦД сосредоточено пока в Японии, хотя технологиями по получению этих продуктов обладают многие страны, в том числе Венгрия, Франция, Бельгия, США и др. Лидером по потреблению ЦД также пока остается Япония.

Первые исследования в области биотехнологии ЦГТ-азы и ЦД в России были начаты в 1984 г. в Московском технологическом институте пищевой промышленности (ныне МГУПП) под руководством доктора биологических наук, профессора Ирины Грачевой. В настоящее время коллектив кафедры «Биотехнология» МГУПП под руководством Ирины Грачевой и заведующей кафедрой, доктора технических наук, профессора Людмилы Ивановой продолжают исследования ЦГТ-азы и ЦД в рамках нового проекта, который осуществляется совместно с Институтом биологии Уфимского научного центра РАН (руководитель работ — кандидат биологических наук Николай Усанов) и Центром «Биоинженерия» РАН (руководитель — доктор химических наук Валерий Варламов).

Главная задача проекта — разработка новых конкурентоспособных как на внутреннем, так и на внешнем рынках, соответствующих международным стандартам технологий получения очищенных α-ЦГТ-азы и β-ЦГТ-азы, α-ЦД и β-ЦД, а также комплексов включений для применения в пищевой и фармацевтической промышленности.

Проводимые в течение последних лет специалистами МГУПП и Института биологии УНЦ РАН исследования позволили разработать эффективные методы направленного экспресс-скрининга и селекции новых продуцентов α- и β-ЦГТ-азы, пригодных для организации рентабельного промышленного производства как ЦГТ-азы, так и ЦД. В этих институтах созданы уникальные коллекции

продуцентов α-ЦГТ-азы и β-ЦГТ-азы, относящихся в основном к бактериям порядка *Bacillales*. Продуценты идентифицированы, детально изучены их культуральные, морфолого-биохимические и филогенетические характеристики. Всесторонне исследованы физико-химические и кинетические свойства ферментов, синтезируемых этими штаммами. Оптимизированы условия выращивания отобранных суперпродуцентов α-ЦГТ-азы и β-ЦГТ-азы в лабораторных ферментерах, условия выделения, концентрирования и очистки α- и β-ЦГТ-азы с использованием методов микро- и ультрафильтрации, вакуумного выпаривания, осаждения органическими растворителями и лиофильной сушки. На стендовых установках получены ферментные препараты α- и β-ЦГТ-азы Г10х и Г20х. Разработаны технические условия и регламенты производства этих препаратов и ЦД на их основе.

Полученные активные образцы ферментных препаратов и ЦД высокой степени очистки пригодны для применения в отечественной пищевой и фармацевтической промышленности. Для получения конкурентоспособных на внешнем рынке препаратов ЦГТ-азы и ЦД необходимо привлечение генноинженерных подходов к созданию гиперпродуцентов ЦГТ-азы, которые разрабатываются в Центре «Биоинженерия» РАН.

В ходе выполнения проекта планируется также получение полимерных производных ЦД для создания комплексов включений с лекарственными препаратами стероидной природы, витаминами (А и Е) и экстрактами ароматических веществ растений. На эти препараты будут разработаны технические условия, их предполагается испытать в пищевых технологических процессах.

Успешная реализация данного проекта позволит создать новые отечественные высокоэффективные экологически безопасные биотехнологии α-ЦГТ-азы и β-ЦГТ-азы, α-ЦД и β-ЦД, а на их основе организовать в будущем промышленное производство комплексов включений с биологически активными веществами нового поколения для пищевой и медицинской промышленности. В перспективе — поиск новых суперпродуцентов γ-ЦГТ-азы и разработка рентабельных способов получения γ-ЦД и комплексов на их основе, которые остаются в мире самыми дорогими, но не менее востребованными. ■

#### ОБ АВТОРАХ

**Валерий Петрович Варламов** — профессор, доктор химических наук, зав. лабораторией «Инженерия ферментов» Центра «Биоинженерия» РАН.

**Ирина Михайловна Грачева** — профессор кафедры «Биотехнология» МГУПП, доктор биологических наук.

**Людмила Афанасьевна Иванова** — профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Биотехнология» МГУПП.

**Николай Глебович Усанов** — кандидат биологических наук, заведующий отделом «Биотехнология» Института биологии Уфимского научного центра РАН.

**Елена Демыгина** — корреспондент журнала «В мире науки».

# ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

Дмитрий Пущаровский

**Одной из наиболее серьезных экологических проблем в настоящее время стало истощение и загрязнение водных ресурсов, что сказывается на питьевом и техническом водоснабжении во многих странах**

Большая часть всемирных запасов пресной воды находится не в реках и озерах, а под землей, однако интенсивная эксплуатация природных ресурсов, растущие города, производственная и сельскохозяйственная деятельность человека нарушают экологическое равновесие и наносят запасам подземных вод серьезный ущерб. Не следует забывать, что подземные воды — полезное ископаемое, особенно ценное своей возобновляемостью в естественных условиях и в процессе эксплуатации. Как сохранить эти скрытые природные богатства? Какие меры необходимо принять по совершенствованию управления подземными водами земного шара?

## Человек и вода

Бурное развитие промышленности в XX в. привело к созданию крупных промышленных районов и промышленно-городских агломераций, на территории которых находятся энергетические комплексы, многочисленные предприятия, технологические производства (в том числе, токсичных веществ), фабрики, места складирования отходов, что приводит к загрязнению окружающей среды, в первую очередь — водоносных горизонтов.

Негативное влияние на химический состав подземных вод (особенно верхних, неглубоко залегающих пластов) оказывают стоки нефтяных промыслов, предприятий горнодобывающей, металлургической, химической промышленности, поля фильтрации, шламонакопители, отвалы, хранилища химических отходов и удобрений. Поэтому неудивительно, что среди загрязняющих веществ преобладают фенолы, тяжелые металлы (медь, цинк, свинец, кадмий, никель, ртуть), сульфаты, хлориды, соединения азота. Свалки и животноводческие комплексы ухудшают биологические показатели качества воды. Ежегодно в мире в окружающую среду попадает около 50 млн. т нефти. Соответственно, одними из «лидеров» среди загрязнителей в настоящее время, наряду с ксенобиотиками, стали нефть и нефтепродукты, в том числе и нефтяные углеводороды.

Крупные водозаборы, обычно располагавшиеся рядом с населенными пунктами и промзонами, по мере разрастания последних попадали в черту города или промышленного объекта, что еще больше усложняло ситуацию. Под влиянием техногенных факторов происходило площадное загрязнение подземных вод, менялась структура питания водоносных горизонтов, территории подтапливались и заболачивались (рис. 1). Но при этом, как правило, условия их эксплуатации и водоотбора оставались неизменными, а оценка ресурсов ▶

## О ФЕДЕРАЛЬНОЙ ЦЕЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЕ

**«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002–2006 годы»**

**Из интервью генерального директора Российского фонда технологического развития Андрея Фонотова экспертному каналу Sciencerrf.ru:**

Положительный момент, свидетельствующий о правильности курса Минобрнауки России, — то, что мероприятия ФЦНТП постепенно выходят за рамки одного министерства. В эту работу вовлекаются Министерство промышленности и энергетики, Министерство экономического развития и торговли, Министерство информационных технологий и связи, другие органы государственной власти. Тем самым, задачи активизации инновационной деятельности начинают занимать центральное место в политике правительства России.



базировалась не столько на качественных (химический состав, бактериальные и органолептические свойства), сколько на количественных показателях (производительность водозаборов). Запасы подземных вод, в том числе и загрязненных, продолжали использоваться водозаборами промышленного типа для хозяйственного и питьевого водоснабжения, что привело к снижению качества питьевой воды, в которой обнаруживается повышенное содержание солей железа, марганца, фтора, йода, селена, стронция и т.д. Во многих случаях содержание этих компонентов значительно превышает так называемые «предельно допустимые концентрации» (ПДК).

По данным Информационного бюллетеня о состоянии недр Российской Федерации, в 2004 г. содержание нормируемых компонентов на групповых водозаборах подземных вод ряда субъектов РФ достигает значений (в единицах ПДК): по железу — до 74,0, марганцу — 36,0, брому — 14,0, фтору — 4,17, кадмию — 5,0, мышьяку — 2,12, нефтепродуктам — 59,0, фенолам — 69,2 и др. Высокие содержания отдельных элементов, проникающих в организм с пищей, водой или воздухом, могут представлять серьезную опасность для человека.

Исследованиями сотрудников лаборатории геохимии окружающей среды Института геохимии КНР выявлено, что допустимое содержание фтора в воде составляет 1 мг/л, и уже при содержании 4 мг/л необходимо использование специальных фильтров. Для Китая, где 240 млн. человек проживают в районах с повышенным

содержанием фтора в воде (достигающим 20 мг/л и приводящим к заболеваниям кариесом, искривлению костей и другим болезням), подобные исследования и рекомендации имеют огромное значение.

Для обеспечения экологически безопасного, бесперебойного гарантированного водоснабжения и водопотребления необходимо проведение комплекса специальных полевых, лабораторных и теоретических исследований. С этой целью была принята программа «Разработка технологий оценки загрязнения и ресурсов подземных вод техногеннонагруженных территорий России».

### Методы исследований

В большинстве стран мира — и Россия в этом отношении не исключение — управление ресурсами, прогноз и оценка загрязнения подземных вод, как правило, проводятся в рамках конкретного объекта или участка эксплуатации, что, в отличие от региональных исследований и мониторинга, в большинстве случаев не позволяет выявить и учесть все факторы, определяющие формирование ресурсов, состава и качества подземных вод. В связи с этим для техногеннонагруженных территорий с наличием многочисленных участков эксплуатации подземных вод, объектов недропользования, промышленных предприятий, мест складирования отходов и других объектов, с которыми могут быть связаны процессы истощения и загрязнения подземных вод, наиболее перспективным является изучение условий формирования и оценка ресурсов, состава и качества подземных вод на территориальном уровне (в границах субъекта РФ).

Исследования административного района, проводимые в масштабах 1:100 000–1:200 000 (в сложных условиях исследования могут выполняться в более крупных масштабах), дают возможность наиболее полно учитывать как геолого-гидрогеологические и геохимические особенности территории, так и специфику существующего и планируемого техногенного воздействия, что принципиально для условий распределения, расходования и восполнения запасов пресных подземных вод при существующей схеме их эксплуатации субъектом РФ, а также ее оптимизации и расширения. Подобный подход поможет разработать научно-обоснованную систему экологически безопасной эксплуатации подземных вод и обеспечить их рациональное хозяйственно-питьевое использование с учетом как перспектив развития данного региона, так и состояния конкретных объектов. С этой целью разрабатываются методики построения региональной балансово-гидродинамической модели территории субъекта РФ с оценкой распределения территорий с естественными условиями формирования состава подземных вод и их качества; вод, состав которых в той или иной мере изменен процессами техногенеза; аномальных участков с интенсивным загрязнением подземных вод.

Объектами исследований стали Калужская область и ряд промышленно-городских агломераций, крупных

городских водозаборов, эксплуатирующих подземные воды, предприятия химической и нефтегазовой промышленности, а также полигоны захоронения твердых и жидких радиоактивных отходов.

Для оценки и переоценки запасов подземных вод, прогноза формирования их химического состава, качества и управления водоотбором используются данные разведки месторождений, гидрогеологического мониторинга, а также результаты контрольных обследований и специальной обработки имеющейся гидрогеологической информации. Однако для того чтобы получить объективную картину и оценить состояние и перспективу эксплуатации водных ресурсов, необходимо совершенствование гидрогеологического мониторинга как на территориальном (Калужская область) уровне (рис. 2), так и на конкретных химических и нефтегазовых комплексах, объектах недропользования, промышленных предприятиях, действующих крупных городских водозаборах, в том числе Воронежа, Курска, Твери, Санкт-Петербурга, Петрозаводска, Архангельска и Кировска. Дополненный комплекс специальных обследований, направленных на оптимизацию работы крупных городских водозаборов, модельно- и эксплуатационно-ориентированный мониторинг помогает не только оценить реальное положение дел на объектах, но и прогнозировать их дальнейшее развитие и рациональное использование.

Опытно-фильтрационные, гидрологические, геофизические и изотопные исследования и согласование результатов, осуществляемое в рамках геофильтрационных моделей, дают возможность предоставить достоверные оценки запасов подземных вод и разработать схемы экологически безопасной эксплуатации их месторождений.

### Экологически безопасная эксплуатация подземных вод

Оценка, прогноз, управление загрязнением и экологически безопасная эксплуатация подземных вод осуществляются на основе обобщения данных систематических наблюдений (мониторинга) с разработкой системы вложенных гидрогеологических (телескопических) моделей разного масштаба. Если генеральная модель включает территорию района, подверженного техногенному воздействию (практически до естественных границ фильтрационных потоков), то вложенная модель низшего уровня (врезка) имеет более точные поля фильтрационных параметров. Такой подход позволяет учитывать все работающие в районе водозаборы и другие объекты, влияющие на состояние подземных вод.

Обоснованные санитарно-гигиенические требования по органолептическим, химическим и микробиологическим показателям могут лечь в основу экологически безопасной эксплуатации месторождений подземных вод. Для этого прежде всего необходим отбор приоритетных показателей их качества, т.к. нормы, действующие сейчас в РФ, не всегда согласуются с требованиями

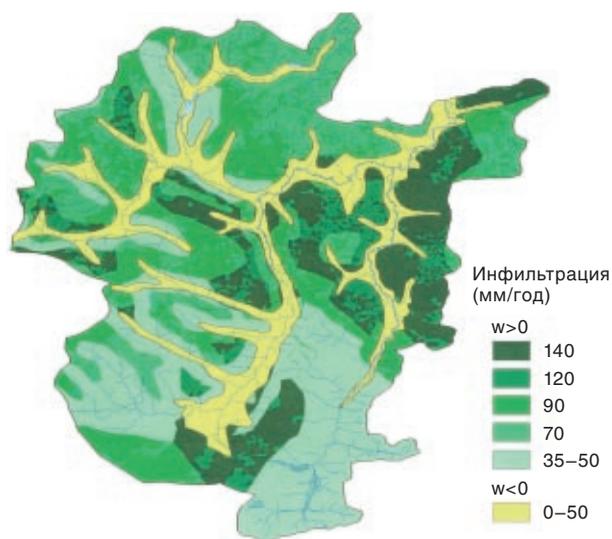


Рис. 2. Калужская область: количественная оценка поступлений воды в водоносный горизонт в бассейне реки Жиздра ( $w > 0$ : инфильтрация превышает испарение;  $w < 0$ : испарение превышает инфильтрацию)

ВОЗ и директивами Совета Европы. Отбор необходимых характеристик позволит выявлять вариабельность химического состава подземных вод, давать комплексные оценки и прогнозы изменения качества подземных вод, регистрировать миграцию химических элементов, бактерий и вирусов, оценивать гидрогеохимические процессы, определяющие защищенность подземных вод от загрязнения.

На основе проведенных исследований будет концептуально разработана общая стратегия контроля, прогноза и реабилитации качества подземных вод на загрязненных территориях в условиях, когда риск от воздействия загрязнения остается минимальным. Главная задача такого рода исследований — оценка защищенности подземных вод на водозаборах, в частности, обоснование размеров и границ зон их санитарной охраны (ЗСО). На водозаборах, находящихся в стадии разведки, предварительные оценки позволят выявить круг наиболее важных гидрогеологических, в частности, миграционных параметров, подлежащих первоочередному опытному изучению. На действующих водозаборах такие оценки дадут возможность корректировки ранее назначенных ЗСО в условиях прогрессирующего загрязнения, а также прогнозирования изменения качества отбираемых вод и разработки дополнительных контрольных водоохраных мер. ■

### ОБ АВТОРАХ

**Дмитрий Юрьевич Пушаровский** — член-корреспондент РАН, профессор, декан геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Михаил Молчанов** — корреспондент журнала «В мире науки».

# ФЕРМЕНТЫ В РЕАКЦИЯХ

## ТОНКОГО ОРГАНИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Витас Швядас

**Оптически активные соединения находят широкое применение в химической, фармацевтической, пищевой промышленности, в сельском хозяйстве**

Оптически активные соединения — компоненты многих биологически активных веществ и лекарственных средств. Так, аминокислоты используются в качестве строительных блоков пептидомиметиков и широко применяются в дизайне лекарственных препаратов. Оптически активные неприродные аминокислоты, такие как D-фенилглицин и D-пара-гидроксифенилглицин, задействованы в промышленном производстве амоксицилина, ампициллина, цефалексина и цефадросила, на долю которых приходится почти половина всего мирового рынка антибиотиков. Хиральные спирты, кислоты, амины также являются важными промышленными интермедиатами, синтез которых сегодня осуществляется главным образом путем химического разделения энантиомеров в процессе кристаллизации с хиральными реагентами. Необходимость практического использования хиральных соединений в оптически чистой форме обусловлена различием в химических и биологических свойствах индивидуальных энантиомеров.

В последние годы наблюдается серьезный прогресс в получении оптически чистых соединений, связанный прежде всего с применением биокаталитических техно-

логий. Принцип использования ферментов для проведения стереоселективных трансформаций состоит в их способности «различать» оптические изомеры различных химических соединений (рис. 1).

Использование стереоселективных ферментативных реакций (рис. 2) для разделения рацемических смесей на оптически чистые изомеры обладает рядом несомненных преимуществ как перед традиционной технологией стереоселективного комплексообразования, так и перед новой технологией хиральной хроматографии.

Основной недостаток первого метода, заключающийся в превращении разделяемого рацемата в смесь диастереомеров за счет комплексообразования с другим хиральным соединением, — высокая стоимость используемых вспомогательных соединений, а также низкая производительность процесса. Хроматографическое разделение рацемических смесей, основанное на использовании так называемых хиральных носителей, т.е. неподвижной фазы с привитым, специально подобранным оптически активным соединением, способным по-разному взаимодействовать с компонентами разделяемого рацемата, — чрезвычайно дорогой процесс, плохо поддающийся масштабированию и пригодный лишь для получения небольшого количества продукта. Использование ферментов, напротив, во многих случаях позволяет

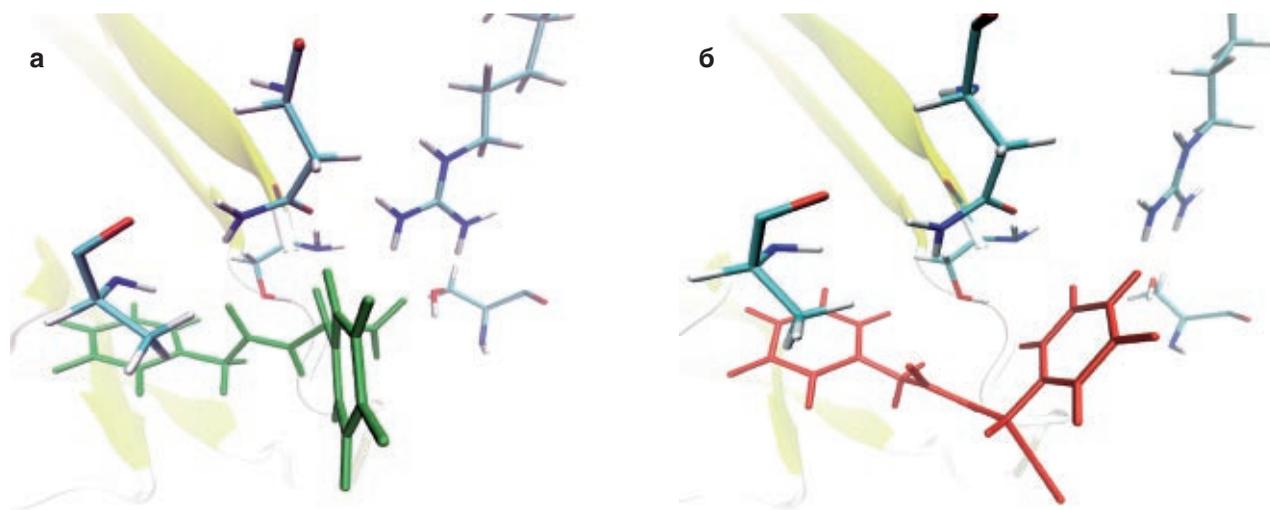


Рис. 1. Различие связывания оптических изомеров субстрата (N-ацилированной аминокислоты) в активном центре фермента: а) S-изомер; б) R-изомер

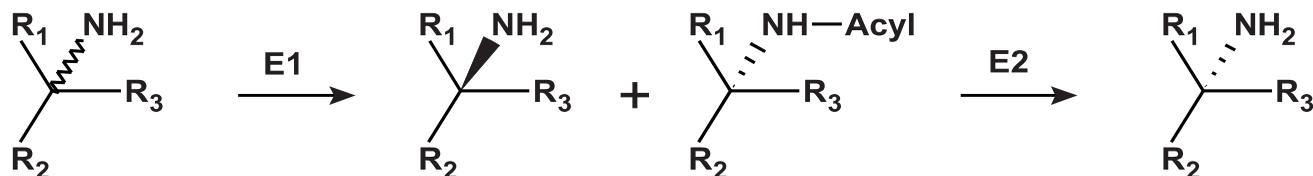


Рис. 2. Получение индивидуальных оптических изомеров аминсоединений при помощи реакций ацилирования и деацилирования

получать оптически чистый продукт (индивидуальный энантиомер) в одну стадию, без затрат на дополнительные дорогостоящие реагенты. Внедрение ферментов повышает экологическую безопасность процесса разделения рацематов, биокаталитические технологии относительно легко масштабируются к промышленной шкале. Факторами, сдерживающими широкое использование биокаталитических технологий, становятся необходимость поиска «своего», специфического фермента для получения интересующего нас класса соединений, а также слабо разработанные методы оптимизации условий получения биокатализаторов и проведения самих ферментативных трансформаций.

### Биокаталитические технологии

Поиск, дизайн и применение биокатализаторов для производства энантиомерно чистых веществ — главные тенденции развития современной биотехнологии. Принципиальная задача заключается в промышленном использовании таких уникальных свойств ферментов, как узкая субстратная специфичность (т.е. умение катализировать лишь необходимую реакцию из множества химически возможных превращений исходных веществ, что обеспечивает чистоту и выход целевого продукта), высокая стереоселективность действия (т.е. умение превращать лишь один из энантиомеров рацемического субстрата, что обеспечивает отличную оптическую чистоту продукта), работа в мягких условиях (т.е. возможность избежать взрыво- и пожароопасных условий, применения агрессивных реагентов, использования высокой температуры и давления). Использование ферментов позволяет создавать экологически привлекательные технологии и минимизировать побочные химические реакции. Практически каждый из нас в своей жизни уже сталкивался с продуктами биокаталитических процессов, такими, например, как широко доступные полусинтетические пенициллины и цефалоспорины: ампициллин, амоксициллин, цефалексин и др., масштабное производство которых стало возможным благодаря промышленному использованию ферментов.

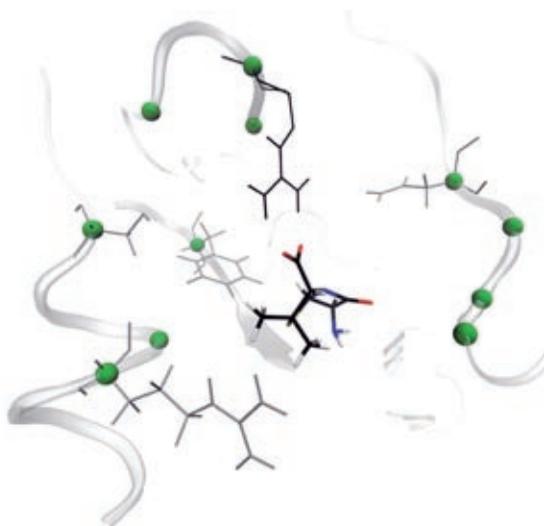
Исследователи возлагают большие надежды на существенное расширение вклада биокатализа в современную промышленность. Мировые химические и фармацевтические гиганты создали специальные лаборатории, занимающиеся разработкой биокаталитических технологий, приоритетные достижения в этой области есть и в России. В научно-исследовательском институте физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского МГУ (НИИФХБ МГУ) разработаны

оригинальные методы использования ферментов для проведения энантиоселективных превращений в водных системах, обладающие целым рядом преимуществ перед химическими и хроматографическими методами получения оптически активных соединений, а также методами использования ферментов в органических растворителях.

Когда в середине 1990-х гг. в мире начался бум в сфере исследования возможностей использования ферментов для органического синтеза, главенствующей тенденцией была ориентация на ферментативные реакции, проводимые в органических растворителях. В НИИФХБ МГУ, в лаборатории ферментативной модификации физиологически активных соединений под руководством доктора химических наук, профессора Витаса Швядаса было выбрано другое, на первый взгляд менее привлекательное направление — исследование возможностей использования ферментов для органического синтеза в водной среде. В то время «водный» биокаталитический синтез пугал всех сложной кинетикой, а достижения практически значимого выхода целевого продукта в таком процессе казалось невозможным. В ходе исследований кинетики и термодинамики ферментативного переноса ацильной группы в водной среде российские специалисты установили, что ферментативный синтез в водных растворах имеет огромный потенциал. Однако он может быть реализован лишь при детальном понимании весьма сложной кинетики процесса и четком управлении этими реакциями. Попытки эмпирической ▶



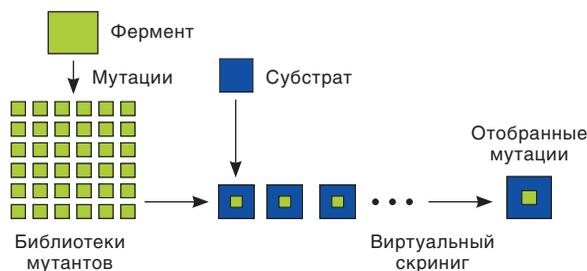
Рис. 3. Структура фермента (пенициллинацилазы) со связанным в активном центре субстратом



**Рис. 4.** Субстрат в активном центре фермента. Зеленым показаны места рекомендованных мутаций на основании молекулярного моделирования

оптимизации в такой довольно сложной системе не позволяют найти нужное решение. В то же время анализ и оптимизация научно обоснованной математической модели процесса позволяют сделать биокаталитический синтез в водной среде без какого-либо использования органических растворителей более выгодным по сравнению с другими методами синтеза.

Сегодня группа молодых ученых НИИФХБ МГУ проводит комплексные исследования, направленные на создание высокоэффективных и конкурентоспособных «водных» биокаталитических технологий получения оптически чистых соединений и обеспечение их патентной защиты на территории России и за рубежом. В качестве целевых продуктов для биокаталитического разделения выбраны наиболее важные, как с точки зрения перспективного использования, так и востребованности на рынке, классы соединений, а именно, неприродные и редкие аминокислоты (в том числе  $\beta$ - и  $\gamma$ -аминокислоты) и их производные, алифатические и ароматические аминокислоты и амины. Биокатализаторами разрабатываемых процессов служат ферменты класса амидогидролаз —



**Рис. 5.** Технология виртуального скрининга мутантных форм фермента: сначала моделируется библиотека мутантных форм фермента, несущих мутации в намеченных ранее позициях, далее проводится оценка взаимодействия выбранного субстрата (субстратов) с каждым мутантом с помощью молекулярного моделирования. Лучшие мутанты отбираются для экспериментального исследования

амидазы (Е.С. 3.5.1.11), ацилазы (Е.С. 3.5.1.14) и протеазы из различных источников (рис. 3).

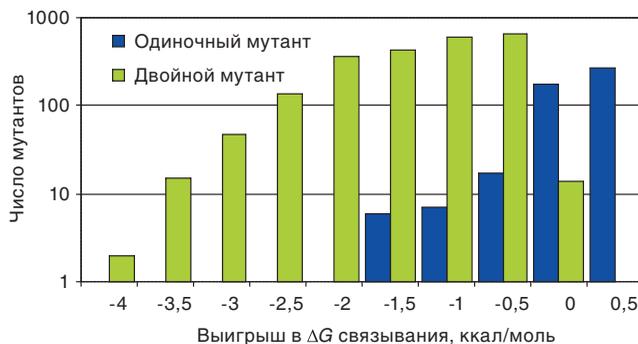
Исследователи работают над дизайном биокатализаторов путем создания рекомбинантных ферментов с улучшенными свойствами и новых высокоэффективных биокатализаторов на их основе, пригодных для использования в крупномасштабных процессах.

По мнению руководителя проекта Витаса Швядаса, успешное развитие в значительной степени определили достижения в теоретическом исследовании каталитического механизма действия выбранных ферментов и молекулярном моделировании ферментативных реакций (рис. 4).

На этой основе был разработан новый, оригинальный подход к компьютерному дизайну ферментов с улучшенными свойствами, практическая реализация которого помогла создать эффективные биокатализаторы для разрабатываемой технологии (рис. 5).

Отбор перспективных мутаций с целью улучшения свойств существующих ферментов, впервые осуществленный при помощи суперкомпьютера *Fujitsu PP850* (рис. 6 и 7), и последующие разработка высокоэффективных систем экспрессии и очистки необходимых мутантных форм ферментов, характеристика их каталитических свойств в реакциях стереоселективного превращения выбранных классов соединений, селекция наиболее перспективных кандидатов для дальнейшей оптимизации методами компьютерного дизайна и белковой инженерии позволили создать высокоэффективные биокатализаторы для процессов получения оптически активных соединений.

Ввиду того, что проект включает в себя широкий спектр исследований, от теоретических расчетов и компьютерного моделирования до создания опытных партий биокатализаторов, для его успешного осуществления привлечены современные методы теоретической химии, молекулярного моделирования, биоинженерии, энзимологии и микробиологии. Так, отправной точкой в создании новых биокаталитических препаратов послужил анализ принципов молекулярной специфичности ферментов с помощью новейших методов теоретической химии. Методами молекулярного моделирования



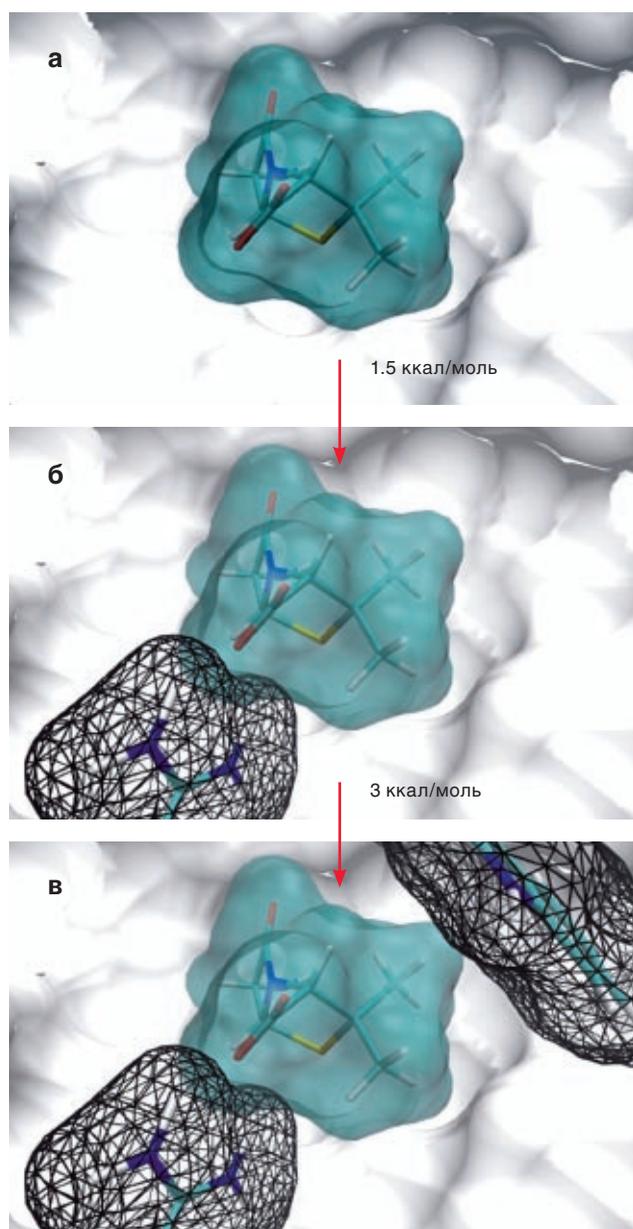
**Рис. 6.** Количество проскринированных мутантов (одиночных и двойных) и соответствующие выигрыши в свободной энергии ( $\Delta G$ ) их взаимодействия с субстратом

были получены принципиальные результаты, позволившие на качественно новом уровне подойти к пониманию специфичности и рациональным стратегиям дизайна амидогидролаз как катализаторов синтеза. Решение этой задачи стало возможным лишь в последние годы в результате разработки оригинальных компьютерных программ и использования весьма мощных вычислительных ресурсов: суперкомпьютера *Fujitsu PP850* и компьютерного кластера НИИФХБ МГУ, кластерных систем Научно-исследовательского вычислительного центра (НИВЦ МГУ), активного использования современных распределенных вычислений.

Успешное развитие проекта под руководством профессора Витаса Швядаса обусловило эффективное взаимодействие трех молодых научных групп из НИИФХБ МГУ: группы молекулярного моделирования (руководитель — к.х.н. Гермес Чилов), группы кинетических исследований ферментативных реакций (руководитель — к.х.н. Максим Юшко) и группы препаративных биокаталитических методов (руководитель — к.х.н. Дорел Гуранда), а также конструктивное научное сотрудничество с лабораторией параллельных информационных технологий НИВЦ МГУ, возглавляемой членом-корреспондентом РАН Владимиром Воеводиным, лабораторией генетической инженерии ферментов Химического факультета МГУ под руководством профессора Владимира Тишкова, и лабораторией гомолитических реакций элементоорганических соединений Института элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, руководимой доктором химических наук Константином Кочетковым.

Необходимо отметить ряд оригинальных методических достижений, способствовавших успешному выполнению работы. Авторы проекта смогли надежно определить стереоселективность ферментов в реакциях, которые ранее не удавалось охарактеризовать количественно (показано, что стереоселективность выбранных биокатализаторов может достигать десятков тысяч). Разработаны методики работы с так называемыми невидимыми субстратами (т.е. с труднодетектируемыми реакциями) по интегральному кинетическому анализу одновременно протекающей видимой реакции. Синтезирован ряд новых реагентов и разработаны новые методы хирального анализа аминок спиртов и аминов. В дополнение к инструментальным методам разработчиками создана оригинальная математическая модель, описывающая протекание биокаталитических превращений во времени и позволяющая впервые провести предсказание поведения «водных» биокаталитических систем в широком диапазоне условий, что дало возможность провести оптимизацию биокаталитических процессов синтеза оптически активных соединений.

Опыт выполнения данного проекта показывает, что при эффективном междисциплинарном подходе удастся получить не только приоритетные фундаментальные научные результаты, разработать современную наукоемкую технологию, но и создать перспективный и конкурентоспособный инновационный продукт. ■



**Рис. 7.** Последовательное улучшение фермента сначала одиночной мутацией, улучшающей взаимодействие с субстратом, а затем отбором второй мутации, стабилизирующей фермент-субстратный комплекс: а) субстрат (6-аминопенициллановая кислота), связанный с нативным ферментом, б) с одиночным мутантом, в) с двойным мутантом

#### ОБ АВТОРАХ

**Витас Каятоно Швядас** — профессор, доктор химических наук, лауреат Государственной премии СССР по науке и технике, заведующий отделом биокинетики научно-исследовательского института физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского.

**Елена Демыгина** — корреспондент журнала «В мире науки».

## братья-славяне



**Македония глазами россиян:** Сборник. М.: Рудомино, 2005.

Как ни исхожена и ни изъезжена Европа россиянами, однако и здесь остались уголки, куда массовый турист не успел еще проторить тропу. Такова, например, Македония — маленькое государство, отколовшееся

от Югославии в ходе распада страны и зажатое между своей бывшей метрополией, Грецией, Болгарией и Албанией.

Сейчас Македония переживает не легкие времена. Соседи предъявляют к ней территориальные претензии, греки обвиняют ее в присвоении исторического наименования одной из провинций Эллады, всего несколько лет назад, в 2001 г. она оказалась под прямой угрозой утраты суверенитета и территориальной целостности, однако страна не унывает и с достоинством противостоит всем вызовам. Конечно, в современной геополитике роль и место Македонии незначительны, но для нас, россиян, важно, что в сердце Европы есть дружественное славянское, православное государство, которое, может быть, даже в большей степени, чем Россия, сохранило дух наших общих предков. Между прочим, именно здесь был основан первый славянский университет, впервые на славянский язык было переведено Священное писание, сохранились уникальные старинные

памятники православной культуры: церкви, фрески, рукописи.

Предлагаемая книга представляет собой любопытный сборник воспоминаний и записок русских путешественников, побывавших в Македонии с XIX по XXI вв. Среди них и известный филолог и историк XIX в. В.И. Григорович, и его младший современник, дипломат и поэт М.А. Хитрово, и М. Карлова, безвестная путешественница, чуть ли не первая русская женщина, побывавшая полтора столетия назад в Македонии, и современные журналисты, писатели, автолюбители, поделившиеся своими впечатлениями от поездки. Перед читателем разворачивается живая история миниатюрной южноевропейской страны, культура которой впитала множество традиций: славянскую, византийскую, греческую, турецкую, и не утратила самобытности.

Книга предназначена для массового читателя-славянофила, проявляющего интерес к быту и культуре наших единоверцев.

Дарья Костикова

## проблема планетарной защиты земли

Предлагаемое исследование впервые в истории отечественной литературы, посвященной этой проблеме, обобщает современные данные о падении космических тел на сушу и водную поверхность Земли, рассматривая, в том числе, вопросы прогнозирования и возможности устранения астероидной и космической опасности. В основу коллективной монографии легли фундаментальные исследования по программе Президиума РАН № 13 «Изменения окружающей среды и климата: природные катастрофы».

Несмотря на то, что наша цивилизация становится все более тех-

ногенной, урбанистичной и индустриальной, в своей основе человек по-прежнему — дитя природы. Вероятно, из-за этого земляне так беспечны по отношению к угрозам природных катастроф и гораздо более серьезно относятся к опасностям, которые исходят от других людей, их воли и активности. В 1980 г. лауреат Нобелевской премии по физике Луис Альварес и его коллеги впервые связали падение гигантского астероида с массовым вымиранием биоты (в частности, динозавров), произошедшим 65 млн. лет назад. Найден и соответствующий кратер Чиксулуб (на территории Мексики, в районе

полуострова Юкатан), который образовался в результате падения астероида размером приблизительно 10–15 км, что ознаменовало собой конец мезозойской эры. Прогрессу научных представлений в этой области способствовали развитие методов вычислительной математики, появление мощных компьютеров, а также определенный уровень накопления исследовательских данных о событиях на поверхности нашей планеты и в ее атмосфере, связанных с ядерными взрывами и природными катастрофами.

Коллективная монография содержит научные обоснования поража-

ющих воображение фактов, связанных с падением космических тел. Ключевым моментом изысканий в этой сфере, в каком-то смысле сформировавшим методологию подобных исследований, стало изучение уникального «тунгусского события» 1908 г. Тунгусская катастрофа до сих пор представляется в прессе как необычайно загадочное явление, много шума поднято вокруг так называемой «тунгусской аномалии», существует и геофизическая версия этого феномена, исключая возможность воздействия внешних сил. Однако отечественные специалисты в работах последних десятилетий обосновывают космогенность «тунгусского события»: оно было вызвано падением космического тела — астероида или кометы — размерами 50–100 м, которое затормозилось в атмосфере на высоте 5–10 км и передало ей свою энергию, эквивалентную 10–50 Мт взрывчатого вещества. По оценкам исследовате-

лей, катастрофа подобного масштаба может произойти в среднем один раз в 300–1000 лет, скорее всего, над океаном, морем или ненаселенной местностью. Однако нужно учитывать, что плотность населения Земли значительно увеличилась. Что будет, если удар астероида придется по густонаселенному пункту? А если «подарок из космоса» упадет на атомную электростанцию или хранилище химического оружия?

Специалисты тщательно моделируют возможные ситуации, просчитывают варианты их развития, обсуждают степень опасности ударных волн, создаваемых космическими телами при столкновении с Землей, теплового излучения и пожаров, облаков пыли и сажи, цунами и других стихийных бедствий. В настоящее время признано, что падение на Землю космического тела размером 1 км может быть серьезной угрозой для цивилизации.

Татьяна Потапова



**Катастрофические воздействия космических тел** / под ред. В.В. Адушкина и И.В. Немчинова. Институт динамики геосфер РАН. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. 310 с.



# НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



**Н. Канани**  
**Парфянская батарея. Электрический ток 2000 лет назад?**

... 14 июня 1936 года близ Багдада при раскопках древней парфянской столицы Ктесифона был найден небольшой керамический сосуд, содержащий медную трубку и железный стержень. Было высказано предположение, что это мог быть древнейший гальванический элемент. Действительно, при наполнении копии сосуда электролитом, например, уксусом, удавалось получить ток! В занимательной, хотя и достаточно строгой форме автор приводит доводы за и против этой гипотезы; сам он считает изобретение парфянами батареек вполне вероятным.



**А.Е. Иванов**  
**Задачник по физике (Механика). Поступи в вуз без репетитора!**

В учебном пособии собраны задачи разной степени сложности: от простых до весьма нетривиальных, которые предлагаются на приемных экзаменах в самые сильные технические вузы. Сборник создавался автором в течение многих лет работы в приемной комиссии и подготовки абитуриентов. Книга будет полезна будущим абитуриентам и преподавателям физико-математических лицеев, гимназий, факультетов довузовской подготовки.

Принимаются заявки на книги с доставкой по России наложенным платежом или с предоплатой по счету. По почте: 125319 Москва, а/я 594, издательство "Техносфера" По факсу: (495) 9563346 E-mail: knigi@technosphera.ru Полная информация о всех вышедших и готовящихся к печати книгах находится на сайте [www.technosphera.ru](http://www.technosphera.ru)

в мире науки [11] ноябрь 2006

91

## ПОЧЕМУ БОЛЬШИНСТВО ПОЧВ – КОРИЧНЕВЫЕ?

Отвечает эколог из Калифорнийского университета в Ирвине **Стивен Аллисон (Steven Allison)**

Темно-коричневые оттенки почве придает значительное количество содержащегося в ней неорганического углерода, который поглощает свет в большей части видимой области спектра. Если этого вещества в земле мало, что может быть обусловлено эрозией или недостатком растительности, проявляются красные, желтые или серые оттенки подстилающих минералов.

Суммарное количество углерода в почвах всего мира составляет  $(1,5-2,3) \cdot 10^{12}$  т, что в 2–3 раза превышает его количество в растениях на всей планете. Возраст основной доли почвенного углерода исчисляется сотнями и тысячами лет. Множество видов бактерий, грибов и других беспозвоночных разлагают и потребляют почвенный углерод. Когда растение умирает, редуценты

(организмы, разлагающие органические вещества) усваивают часть его углерода, а другую выделяют в виде углекислого газа ( $CO_2$ ), однако несколько факторов препятствует их деятельности. Многие микроорганизмы вырабатывают ферменты для разложения органических соединений на меньшие молекулы, которые они способны усвоить, но некоторые формы почвенного углерода они разложить не могут. Вещество стенок клеток мертвых бактерий реагирует с другими соединениями углерода, и образуются сложные полимеры, в частности, гуминовые соединения, которые могут накапливаться в земле, т.к. ферменты не в состоянии их разложить. Гуминовые соединения вместе с подобными им полифенолами могут связывать и инактивировать те самые ферменты, которые, в принципе, должны разлагать.

Действию микробных ферментов препятствуют и другие свойства



среды. В почвах, бедных азотом, микробам может не хватать питательных веществ для синтеза. А поскольку некоторым ферментам необходим кислород в качестве субстрата, его нехватка (например, в болотах и торфяниках) часто вызывает накопление углерода.

## ПОЧЕМУ РАДУГА ИМЕЕТ ФОРМУ ОКРУЖНОСТИ?

Отвечает метеоролог **Национальной метеорологической службы Национального управления океана и атмосферы США (NOAA) Джефф Вальдштрейхер (Jeff Waldstreicher)**

Радуга образуется в результате преломления, т.е. изменения направления луча солнечного света при переходе из одной среды в другую. В воде солнечный свет движется



медленнее, чем в воздухе, и поэтому направление лучей несколько модифицируется. Когда световые лучи падают на капли под определенным углом, в результате их преломления мы и видим радугу.

Разным цветам соответствуют различные длины волн, преломляющиеся немного по-разному, — поэтому радуга и представляется сплошной пестрой полосой, окрашенной сверху красным, а внизу фиолетовым.

Типичные водяные капли имеют сферическую форму, поэтому их влияние на солнечный свет симметрично относительно воображаемой оси, соединяющей центр капли с Солнцем. В результате радуга

имеет форму окружности с центром в точке, прямо противоположной направлению от наблюдателя на Солнце. Всю окружность мы видеть не можем, потому что часть ее заслоняет Земля. Чем ближе светило к горизонту, тем больше видимая часть окружности. В момент захода Солнца мы можем наблюдать половину окружности, высшая точка которой находится в  $42^\circ$  над горизонтом. Чем выше Солнце на небе, тем меньшую часть радуги можно видеть над горизонтом.

Полные тексты этого и других ответов специалистов в различных областях науки представлены на сайте [www.sciam.com/askexpert](http://www.sciam.com/askexpert).



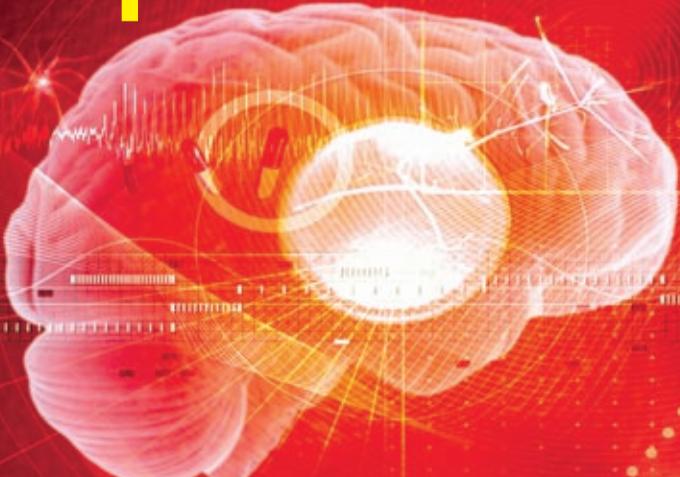


ежемесячный научно-информационный журнал

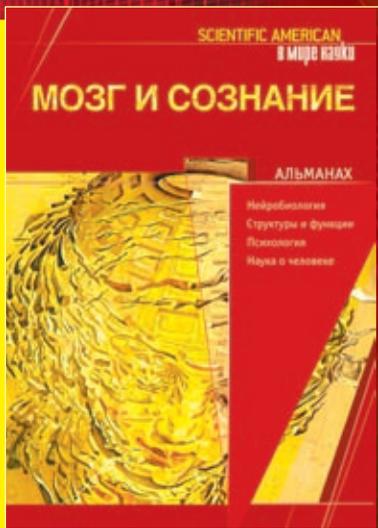
SCIENTIFIC AMERICAN

# В мире науки

www.sciam.ru  
 Подробности по телефонам:  
 105-03-72 и 727-35-30



В 2006 году выходит в свет сборник лучших материалов журнала «В мире науки», посвященный тайнам сознания человека и процессам, происходящим в мозге



SCIENTIFIC AMERICAN  
 В мире науки  
**МОЗГ И СОЗНАНИЕ**  
 АЛЬМАНАХ  
 Нейробиология  
 Структуры и функции  
 Психология  
 Наука о человеке

## Читайте в следующем выпуске журнала:



### КАК ВЗОРВАТЬ ЗВЕЗДУ

Это не так легко, как вы можете подумать. Все эксперименты по моделированию ситуации рождения сверхновой терпели крах. До недавнего времени

### УДАР С ТЫЛА

Вполне вероятно, что причина массовой гибели людей в древности — не космогенные катастрофы, а изменения климата Земли. Ждет ли нас то же самое в будущем?

### МИРОТВОРЦЫ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ

Регуляторные T-клетки, открытые недавно, не позволяют защитной системе тела атаковать само тело. Использование их свойств поможет, например, решить проблему отторжения трансплантированных органов у людей, страдающих диабетом

### ВИРУСНАЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Определенные виды вирусов могут применяться для создания жидкокристаллических устройств, электродов, нанопроводов

### НАУКА О СУДОКУ

Может показаться, что логическими играми интересуются лишь математики и программисты. Однако не так давно головоломка судоку вдруг стала такой же популярной, как кубик Рубика в начале 1980-х гг.

### ЛОСОСЬ — ПИЩА ЛЕСА

Медведи, большие любители лосося, удобряют лес недооцененными остатками своего пиршества. Ценные питательные вещества, содержащиеся в рыбе, служат подкормкой целой армии животных и растений

### ГИДРАВЛИКА В ДОИСТОРИЧЕСКОЙ МЕКСИКЕ

Три тысячи лет назад предшественники ацтеков построили первые крупномасштабные гидравлические системы в Новом Свете

## КАК ОФОРМИТЬ ПОДПИСКУ/ЗАКАЗ НА ЖУРНАЛ «В МИРЕ НАУКИ»

1. Указать в бланке заказа/подписки те номера журналов, которые Вы хотите получить, а также Ваш полный почтовый адрес.

2. Оплатить заказ/подписку в отделении Сбербанка (для удобства оплаты используйте квитанцию, опубликованную ниже).

Оплату можно произвести также при помощи любой другой платежной системы по указанным в этой квитанции реквизитам.

3. Выслать заполненный бланк заказа/подписки вместе с копией квитанции об оплате:

■ по адресу 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 22, редакция журнала «В мире науки»;

■ по электронной почте [distr@sciam.ru](mailto:distr@sciam.ru);

■ по факсу 105-03-72.

Подписку можно оформить со следующего номера.

### БЛАНК ЗАКАЗА ПРЕДЫДУЩИХ НОМЕРОВ ЖУРНАЛА

Я заказываю следующие номера журнала «В мире науки» (отметить галочкой):

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2006 г.												
2005 г.												
2004 г.												
2003 г.												

Ф.И.О. \_\_\_\_\_

Индекс \_\_\_\_\_

Область \_\_\_\_\_

Город \_\_\_\_\_

Улица \_\_\_\_\_

Дом \_\_\_\_\_ Корп. \_\_\_\_\_ Кв. \_\_\_\_\_

Телефон \_\_\_\_\_

E-mail: \_\_\_\_\_

Цена за один номер журнала **65 руб. 00 коп.**

### БЛАНК ПОДПИСКИ

■ Я хочу подписаться на 6 номеров журнала «В мире науки» и плачу **540 руб. 00 коп.**

■ Я хочу подписаться на 12 номеров журнала «В мире науки» и плачу **1080 руб. 00 коп.**

Цена за один номер журнала по подписке в 2006 г. **90 руб. 00 коп.**

Ф.И.О. \_\_\_\_\_

Индекс \_\_\_\_\_

Область \_\_\_\_\_

Город \_\_\_\_\_

Улица \_\_\_\_\_

Дом \_\_\_\_\_ Корп. \_\_\_\_\_ Кв. \_\_\_\_\_

Телефон \_\_\_\_\_

Дата рождения \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /20 \_\_\_\_\_

ЗАО «В мире науки»  
 Расчетный счет 40702810100120000141  
 в ОАО «Внешторгбанк» г. Москва БИК 044525187  
 Корреспондентский счет 30101810700000000187  
 ИНН 7709536556; КПП 770901001

\_\_\_\_\_  
 Фамилия, И.О., адрес плательщика

Вид платежа	Дата	Сумма
Подписка на журнал «В мире науки» на _____ номеров		
Плательщик		

ЗАО «В мире науки»  
 Расчетный счет 40702810100120000141  
 в ОАО «Внешторгбанк» г. Москва БИК 044525187  
 Корреспондентский счет 30101810700000000187  
 ИНН 7709536556; КПП 770901001

\_\_\_\_\_  
 Фамилия, И.О., адрес плательщика

Вид платежа	Дата	Сумма
Подписка на журнал «В мире науки» на _____ номеров		
Плательщик		

### ОФОРМИТЬ ПОДПИСКУ МОЖНО:

■ по каталогу «Пресса России», подписной индекс 45724; «Роспечать», подписной индекс 81736; изданий органов НТИ, подписной индекс 69970; «Почта России», подписной индекс 16575

■ на Украине по каталогу подписных изданий агентства KSS, подписной индекс 69970

■ Все номера журналов можно купить в редакции журнала по адресу: ул. Радио, дом 22, комн. 409, тел./факс (495) 105-03-72

■ В ООО «Редакция УРСС» по адресу: проспект 60-летия Октября, д. 9, оф. 203, тел./факс (495) 135-42-16.

■ В книжных магазинах научного центра «ФИЗМАТКНИГА» (тел. 409-93-28): г. Долгопрудный, новый корпус МФТИ; г. Зеленоград, МИЭТ, 4-й корпус

■ В интернет-магазинах: [www.ozon.ru](http://www.ozon.ru), [www.setbook.ru](http://www.setbook.ru), [www.urss.ru](http://www.urss.ru).

