

Познавательный журнал для хороших людей

НАУКА

из первых рук

3

3⁽²⁷⁾
● 2009

ВИРУС ЗАПАДНОГО
НИЛА: КРУГОСВЕТКА

КАК ЧИТАЮТ ГЕНЫ

МНОГОГОЛОСЬИЙ
ШЕПОТ УЗОНА

АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
ТРАНСПОРТ БУДУЩЕГО

ISSN 18-10-3960



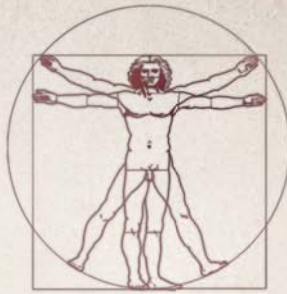
9 771810 396003 27

ЯДЕРНАЯ ТОПКА **ЗЕМЛИ**

НАУКА ИЗ ПЕРВЫХ РУК

№ 3 (27) 2009

Познавательный журнал
для хороших людей



Редакционная коллегия

главный редактор
акад. Н.Л. Добрецов

заместитель главного редактора
акад. В.В. Власов

заместитель главного редактора
акад. В.Ф. Шабанов

ответственный секретарь
Л.М. Панфилова

акад. М.А. Грачев

акад. А.П. Деревянко

чл.-кор. А.В. Латышев

чл.-кор. Н.П. Похиленко

акад. М.И. Эпов

к. ф.-м. н. Н.Г. Никулин

Редакционный совет

акад. Л.И. Афтанас

чл.-кор. Б.В. Базаров

чл.-кор. Е.Г. Бережко

акад. В.В. Болдырев

чл.-кор. А.Г. Дегерменджи

д.м.н. М.И. Душкин

проф. Э.Краузе (Германия)

акад. Н.А. Колчанов

акад. А.Э. Конторович

акад. М.И. Кузьмин

акад. Г.Н. Кулипанов

д.ф.-м.н. С.С. Кутателадзе

проф. Я. Липковски (Польша)

чл.-кор. Н.Э. Ляхов

акад. Б.Г. Михайленко

акад. В.И. Молодин

д.б.н. М.П. Мошкин

чл.-кор. С.В. Нетесов

чл.-кор. М.Д. Новопашин

д.х.н. А.К. Петров

проф. В. Сойфер (США)

чл.-кор. А.М. Федотов

д.ф.-м.н. М.В. Фокин

д.т.н. А.М. Харитонов

чл.-кор. А.М. Шалагин

акад. В.К. Шумный

д.и.н. А.Х. Элерт

«Естественное желание хороших
людей — добывать знание»

Леонардо да Винчи

Периодический научно-популярный журнал

Издается с января 2004 года

Периодичность: 6 номеров в год

Учредитель: Сибирское отделение
Российской академии наук

Издатель: «ИНФОЛИО»

Адрес редакции:
630055, Новосибирск,
ул. Мусы Джалиля, 15
Тел.: +7 (383) 332-1540, 332-1439
Факс: +7 (383) 332-1540
e-mail: zakaz@infolio-press.ru
e-mail: editor@infolio-press.ru

www.ScienceFirstHand.ru

Журнал зарегистрирован
в Комитете РФ по печати

Свидетельство ПИ № 77-15734
от 23 июня 2003 г.

ISSN 1810-3960

Тираж 2 000 экз.

Отпечатано в типографии
ООО «ИД "Вояж"» (Новосибирск)

Дата выхода в свет 29.06.2009

Свободная цена

Перепечатка материалов только
с письменного разрешения редакции

© Сибирское отделение РАН, 2009
© «ИНФОЛИО», 2009

Над номером работали

Л. Беляева
А. Владимирова
М. Гончарова

д.б.н. М. Долгов

Д. Жарков

А. Мистрюкова

к.б.н. Л. Овчинникова

Л. Панфилова

М. Роговая

С. Уфимцева

А. Харкевич

С. Янушко



Дорогие друзья!

Научные гипотезы чаще всего рождаются, чтобы объяснить факты, не укладывающиеся в рамки существующих теорий. Материал рубрики «Гипотезы и факты» нового номера журнала в полной мере отвечает ее названию: в нем излагаются, с одной стороны, интригующие эмпирические данные, требующие интерпретации, с другой – концепция, выстраивающая разрозненные явления в единую систему, серьезная экспериментальная проверка которой, однако, еще впереди.

Общеизвестно, что в недрах звезд идет термоядерный синтез. В этих реакциях синтеза водород превращается в гелий с выделением колоссальной энергии. Авторы статьи, которую мы предлагаем вниманию читателя, в качестве природного реактора рассматривают объект более «приземленный» – саму нашу Землю. Только речь они ведут не о термоядерных, а о ядерных реакциях деления – тех самых, что используются в атомной бомбе и реакторах АЭС.

Наши авторы не одиноки в своих изысканиях: идея, что в природе без участия человека могут существовать ядерные реакторы, владеет умами многих ученых. Но в чем безусловная заслуга сотрудника новосибирского Института гидродинамики В.Ф. Анисичкина и его коллег – они предложили обоснованную гипотезу, в которой указали конкретное место критической концентрации урана и тория – поверхность твердого внутреннего ядра Земли – и проанализировали режимы цепных ядерных реакций в такой гипотетической зоне скопления радиоактивных элементов.

Эта работа – междисциплинарное исследование на стыке физики, химии, геологии и даже... астрономии. Авторам пришлось привлечь массу разнообразных экспериментальных данных: по сейсмологическому зондированию, изотопному составу гелия, глобальным изменениям климата, инверсиям магнитного поля, а также информацию по геонейтрину. При компьютерном моделировании геореакторов исследователи столкнулись

с серьезными вычислительными трудностями, поскольку традиционные методы теории реакторов применяются для расчета процессов длительностью максимум в годы, а здесь потребовалось просчитывать временные интервалы в миллиарды лет!

И все-таки то, что Земля является ядерным реактором, пока только гипотеза. Подтвердить или опровергнуть ее, возможно, удастся с помощью планетарной сети нейтринных детекторов, которая сейчас создается. Ожидается, что в ближайшее десятилетие сигналы геонейтринно будут измерены в нескольких местах земного шара, и это позволит определить точное месторасположение их источников внутри Земли и другие характеристики.

Соблюдая объективность, следует отметить, что в настоящее время существуют разные точки зрения на изложенную проблему, и вопрос о природе источника энергии в недрах Земли является очень дискуссионным. Часть этих дискуссионных моментов отмечены в комментариях к статье. Мне как геологу модель природного ядерного реактора на границе внутреннего и внешнего ядра импонирует уже тем, что она не противоречит имеющимся знаниям в области геодинамики и фактам плюмового магматизма.

В новом выпуске журнала в рубрике «Новости науки» мы продолжаем публикацию научных результатов, признанных лучшими в СО РАН при подведении итогов 2008 года. Все отобранные редакцией работы выполнены в физических институтах, поэтому неудивительно, что пространственный масштаб этих исследований, как всегда в физике, оказался необычайно широк: от сверхточного стандарта частоты, реализуемого на основе ультрахолодных атомов, до волновых процессов на Солнце – самом большом объекте околоземного космоса.

академик Н.Л. Добрецов,
главный редактор



Мощный импульсный **ЛАЗЕР** может оказаться эффективным средством для ослабления **ЗВУКОВОГО УДАРА** в авиации. **С. 12**

Обнаруженные на Солнце **ПЛАЗМЕННЫЕ ВОЛНЫ** помогут объяснить аномальный разогрев **СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ**. **С. 15**

На смену **РАКЕТАМ** и «**ЧЕЛНОКАМ**» придут **ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКИЕ САМОЛЕТЫ**, способные взлетать с обычного аэродрома. **С. 36**



.01

НОВОСТИ НАУКИ

- 6 **Нефть** – это глобально!
О присуждении премии «Глобальная энергия»
Сделано в СО РАН
- 10 **А. Н. Гончаров**
Новое время
- 12 **В. Ф. Чиркашенко**
Свет против звука
- 15 **Н. И. Кобанов, А. А. Скляр**
Волны в корональных дырах на Солнце
- 18 **В. Е. Панин, В. П. Сергеев**
Нано для космоса
- 20 **А. Р. Нестеренко**
Астрономия и общество

.02

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

- 22 **Н. Г. Гранин**
Окольцованный Байкал
- 24 **С. В. Нетесов**
Свиной грипп в вопросах и ответах

.03

ГИПОТЕЗЫ И ФАКТЫ

- 26 **В. Ф. Анисичкин, А. А. Безбородов**
Ядерная топка Земли

.04

ГОРИЗОНТЫ НАУКИ

- 36 **Э. Краузе, А. М. Харитонов**
Аэрокосмический транспорт будущего

В **КРАТЕРАХ**, образовавшихся при падении на Землю крупных небесных тел, находят необычные **ИМПАКТНЫЕ АЛМАЗЫ**. **С. 70**

РУБАХИ сибирских **СТАРООБРЯДЦЕВ** «поляков» ведут свою историю от **ДРЕВНЕРИМСКИХ ТУНИК**. **С. 84**

В среднем по размеру **КОРАЛЛОВОМ АТОЛЛЕ** можно уместить 15 тысяч **ПИРАМИД ХЕОПСА**. **С. 108**



.05

ЧЕЛОВЕК

- 46 **В. Б. Локтев**
Вирус Западного Нила: кругосветка
- 54 **И. В. Морозов**
Как «читают» гены

.06

ФАКУЛЬТЕТ

- 62 **А. В. Аржанников, А. А. Шкляев, В. А. Володин**
Раздвигая горизонты наномира
- 70 **В. П. Афанасьев**
Родословная кристаллического углерода

.07

МУЗЕИ И КОЛЛЕКЦИИ

- 84 **Е. Ф. Фурсова**
Сибирские старообрядцы: история в костюмах

.08

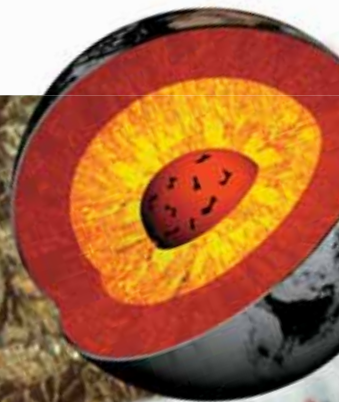
ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ЭКСПЕДИЦИЙ

- 92 **В. В. Власов, В. Е. Репин, В. С. Прасолов, Г. А. Карпов**
Многоголосый шепот Узоны

.09

ЛИЦОМ К ПРИРОДЕ

- 108 **Ю. Я. Латыпов**
Подноготная кораллового рифа



Нефть – это глобально!

5 июня 2009 г. на Петербургском экономическом форуме состоялось вручение международной премии «Глобальная энергия». Она присуждена российским геологам академиком А. Э. Конторовичу и Н. П. Лавёрову за фундаментальные исследования и широкое внедрение новых методов геологоразведки и разработки месторождений нефти, газа, урана, а также за открытие крупнейших источников энергетического сырья. Третьим лауреатом, разделившим награду с нашими соотечественниками, стал профессор Б. Сполдинг из Великобритании.

Эту премию, считающуюся аналогом Нобелевской в области энергетики, ежегодно получают два-три человека. За семь лет на соискание премии «Глобальная энергия» было выдвинуто более 1600 ученых из разных стран мира. Ее удостоились 10 зарубежных и 10 российских ученых, трое из которых – сибиряки. В 2003 г. награду получил академик Г. А. Месяц, в 2007 г. – академик В. Е. Накоряков. И вот теперь почетную награду принес Сибирскому отделению РАН Алексей Эмильевич Конторович.

В этом году впервые премией были отмечены фундаментальные исследования по научному обоснованию крупнейших нефтегазоносных и ураноносных провинций, имеющих поистине глобальное значение, а также работы в области теории и методики прогноза, поисков и разведки таких провинций.

Успехи наших геологов в этой сфере, начиная еще с довоенных лет, общепризнанны: они на многие десятилетия обеспечили нефтью, газом и углем крупнейшую державу мира. И говоря о достижениях современной геологической науки в лице А. Э. Конторовича, будет уместно вспомнить о выдающихся предшественниках и учителях нынешнего поколения ученых.

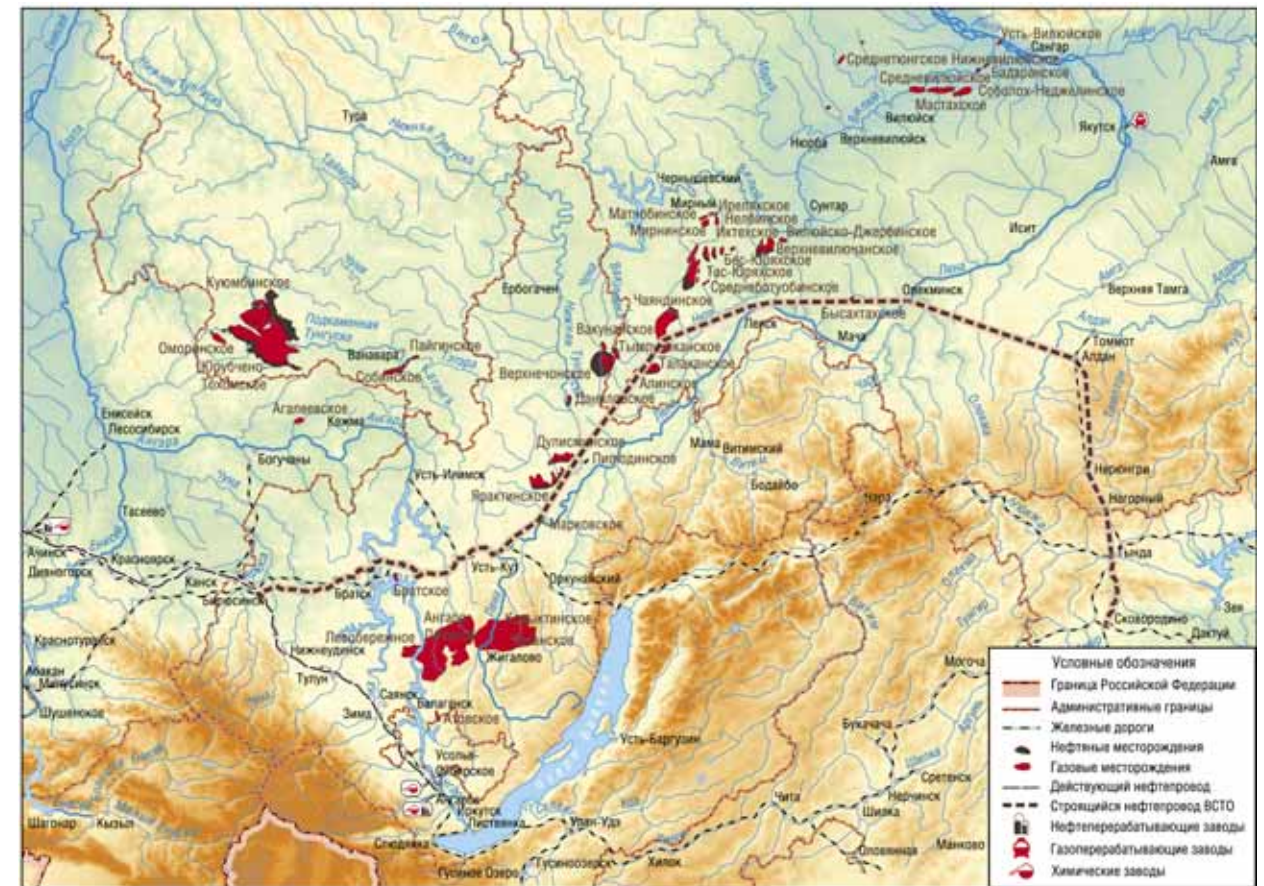
Еще в начале XX в. вся нефть России, а затем и СССР, была сосредоточена главным образом в Азербайджане и на Северном Кавказе. В 1920–1930-е гг. советскими геологами были выдвинуты новые идеи, где надо искать нефть.

На нефтеносность древних кембрийских слоев Восточной Сибири впервые указал в 1929 г. академик А. Д. Архангельский. История показала, что места были определены им верно, а возраст основных нефтегазоносных горизонтов оказался даже большим, чем он предполагал. В настоящее время нефть и газ здесь найдены и в более древних верхнепротерозойских слоях (от 1 млрд до 540 млн лет).

В 1932 г. академик И. М. Губкин предсказал возможность обнаружения большой нефти в Западной Сибири. Это стало настоящим открытием «на кончике пера», поскольку месторождения Западной Сибири в отличие от старых нефтяных районов устроены так, что никаких нефтепроявлений на поверхности Земли нет. Это был блестящий научный прогноз, основанный на великолепной интуиции ученого. Губкин полагал, что сибирская



Академик А. Э. Конторович на пресс-конференции в новосибирском Академгородке по случаю присуждения ему премии «Глобальная энергия»



нефть обеспечит весь Советский Союз. Он оказался прав. Но тогда многие известные геологи не приняли всерьез его пророчества.

И. М. Губкин первым предложил и новый метод изучения нефтегазоносных провинций путем проведения региональных геофизических работ, опорного и параметрического бурения. Этот подход и по сей день является основным. Он позволил советским ученым открыть много нефтегазоносных провинций на востоке европейской части страны, в Сибири, на Дальнем

Первая очередь нефтепровода ВСТО (Восточная Сибирь – Тихий океан), маршрут которого разработан при участии А. Э. Конторовича, будет запущена в эксплуатацию в конце 2009 – начале 2010 г. Этот вариант трассы не только экономически выгоден, но и экологически наиболее безопасен

Востоке, в Средней Азии и Казахстане, в западном секторе российского шельфа Северного Ледовитого океана.

Прогноз Губкина в части Западной Сибири был реализован уже после Великой Отечественной войны. Для его осуществления много сделали выдающиеся ученые Н. Н. Ростовцев, А. А. Трофимук, Ф. Г. Гурари, В. П. Казаринов, М. К. Коровин, В. Д. Наливкин, И. И. Нестеров, В. С. Сурков, крупные организаторы геологоразведочного производства Ю. Г. Эрвье, Л. И. Ровнин, Ф. К. Салманов, В. В. Семенович, И. А. Иванов, Ю. К. Миронов, В. Т. Подшебякин, Н. Г. Рожок, Л. Г. Цибулин. В середине 1960-х гг. началось освоение ресурсов нефти и газа Западной Сибири, которые не только удовлетворили потребности СССР, но и сделали нашу страну крупнейшим в мире экспортером.

И. М. Губкин научно обосновал также открытие Волго-Уральской нефтегазонасной провинции, где потом великолепных результатов добился молодой геолог, один из будущих основателей Сибирского отделения Академии наук А. А. Трофимук. В годы войны, когда доставка кавказской нефти осуществлялась кружным путем – через Среднюю Азию и Сибирь, – в Башкирии забил фонтан нефти производительностью 2 тыс. т в сутки! За это открытие в тридцать три года А. А. Трофимук первым среди геологов был удостоен в 1944 г. звания Героя Социалистического Труда. Вклад Трофимука и его соратников в дело Победы трудно переоценить. Нефть из скважин Трофимука немедленно шла на переработку и – на фронт!

С наступлением мирного времени значение «черного золота» не уменьшилось. Первое общее собрание Западно-Сибирского филиала Академии наук (созданного в 1944 г.) открылось 10 мая 1945 г., на нем обсуждался один вопрос – возобновление поисков нефти в Западной Сибири.

Уже через три года были забурены первые скважины и созданы геологоразведочные организации, в 1953 г. получен промышленный газ в Березове и год спустя – первые пленки нефти в Колпашеве.

С конца 1950-х гг. активное участие в научном обосновании, открытии и освоении нефтегазонасных провинций Сибири принимает Алексей Эмильевич

Конторович. Он заложил фундаментальные основы методов прогноза нефтегазонасности, под его руководством разработаны новые методы количественного анализа структуры энергоресурсов, произведена оценка перспективности крупнейших нефтегазонасных бассейнов России, Средней Азии, Китая. Многие десятилетия он является одним из лидеров научного поиска месторождений нефти и газа в Западной Сибири. В честь А. Э. Конторовича названо нефтяное месторождение в Томской области.

Вместе с академиками А. А. Трофимуком и В. С. Сурковым А. Э. Конторович сыграл особую роль в обосновании нефтегазонасности докембрия Сибирской платформы, открытии Лено-Тунгусской нефтегазонасной провинции, в научном сопровождении поисковых и оценочных работ на Ванкорском, Верхнечонском, Дулисьминском, Курумбинском, Среднеботуобинском, Сузунском, Чайядинском, Юрубчено-Тохомском и других месторождениях, в обосновании трассы нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан», разработке концепции формирования новых центров нефтяной и газовой промышленности в Восточной Сибири и Республике Саха (Якутия).

При всей важности поиска и разработки нефтегазовых ресурсов дальневидные ученые уже сейчас анализируют пути перевода значительной части российской энергетики на угольное топливо. В марте этого года А. Э. Конторович, являющийся научным руководителем новосибирского Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, возглавил Кемеровский научный центр.

Его основная задача на этом посту – вместе с администрацией области и институтами СО РАН разработать научные подходы к переводу экономики Кузбасса на качественно новый, инновационный путь развития. Здесь же планируется начать работы по добыче такого нетрадиционного природного ресурса, как угольный метан, запасы которого весьма велики.

Слухи о том, что запасы углеводородов на Земле скоро закончатся и человечество в одночасье останется без энергетических ресурсов, сильно преувеличены. Что касается нефти, то, по мнению лауреата, примерно с 2050-х гг. уровень мировой добычи действительно



начнет падать и к концу века снизится до 2–2,5 млрд т в год (ныне добывается почти 4 млрд т). Однако во многих странах мира есть гигантские месторождения тяжелой, более трудоемкой по добыче нефти – битумные пески и сланцы, залегающие на глубинах 2–3 км, из которых можно получить весь комплекс нефтепродуктов. А, например, вдоль Лены от Северного Ледовитого океана до Алдана сланцы залегают практически на поверхности. Запасов вот такой нефти хватит, чтобы удерживать добычу на текущем уровне до конца XXI в., а возможно, и в следующем столетии.

На протяжении всей своей истории человек решал любые задачи, которые перед ним ставило развитие цивилизации. В поисках новых мощных сырьевых баз энергоносителей мы уходим от обжитых мест во все

более труднодоступные районы. Россиян такие трудности никогда не пугали, и отечественная геологическая наука, безусловно, еще не раз скажет свое веское слово в ответ на глобальные энергетические вызовы нашего времени.

Вслед за освоением Восточной Сибири нас ждет Арктика и Северный Ледовитый океан. Вместе с академиком Н. Л. Добрецовым А. Э. Конторович сейчас развертывает большой цикл исследований минеральных ресурсов Арктики. Сибирское отделение РАН последовательно работает над реализацией великого завета первого русского академика М. В. Ломоносова: «Могущество российское будет прирастать Сибирью и Северным Ледовитым океаном!»

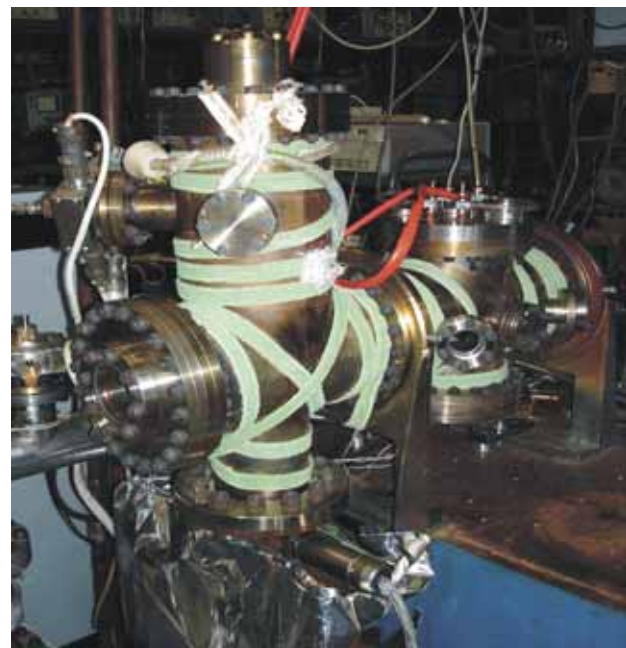
СДЕЛАНО В СО РАН

Новое время

В Институте лазерной физики СО РАН (Новосибирск) ведутся пионерные исследования по созданию нового поколения стандартов частоты на основе высокостабильных лазеров и ультрахолодных атомов. Сверхузкие линии поглощения охлажденных и локализованных с помощью лазерного излучения атомов щелочно-земельных элементов позволят в ближайшем будущем разработать первичный эталон одной из основных физических величин – времени.

Измерения различных величин лежат в основе всей современной науки и техники. Измерять – значит сравнивать некую величину с эталоном (стандартом). Без эталонов невозможно проводить точные измерения.

Стандарты частоты в этом ряду занимают особое место. Они играют важнейшую роль как в фундамен-



Первая в России магнитооптическая ловушка для щелочно-земельных атомов разработана в СО РАН. На основе подобных устройств будут созданы стандарты частоты нового поколения

тальных научных исследованиях, так и в различных метрологических и навигационных приложениях. Это связано в первую очередь с тем, что стандарты частоты, реализующие с 1967 г. эталон одной из основных единиц системы СИ – секунды, на много порядков более точные по сравнению с другими эталонами.

В настоящее время первичный стандарт частоты строится на основе стабильного перехода (9,2 ГГц) между подуровнями *сверхтонкой структуры* атома цезия-133. На этом стандарте базируется международная шкала атомного времени TAI.

Атомные стандарты частоты микроволнового диапазона получили широкое распространение в навигационных системах GPS и ГЛОНАСС, где компактные цезиевые и рубидиевые устройства с относительной точностью 10^{-13} (уход частоты за сутки) установлены на каждый из спутников системы, а водородные – с долговременной стабильностью около 10^{-14} – на наземные станции слежения. Высокая точность определения координат с помощью этих навигационных систем достигается в значительной степени благодаря точности частоты.

Заметим, что прецизионность цезиевого стандарта увеличилась по сравнению с его первой реализацией на 5 порядков (!) и приблизилась, по всей видимости, к своему пределу. Достигнутая на сегодня точность порядка $4 \cdot 10^{-16}$ для стационарных установок с использованием «фонтана» холодных атомов ограничивается фундаментальными физическими причинами, такими как сдвиг частоты за счет столкновений атомов, теплового излучения, гравитационный сдвиг и т. д.

Дальнейшее увеличение точности специалисты связывают с уходом из микроволнового диапазона в оптический. Важным преимуществом оптических стандартов является их потенциально большая стабильность за короткие времена (0,1–100 с), что должно позволить существенно быстрее проводить измерения. В качестве реперов предполагается использовать узкие резонансы в спектрах поглощения *ультрахолодных* (температура около 1 микрокельвина) и *локализованных* (захваченных) в электромагнитные и оптические ловушки одиночных ионов и ансамблей нейтральных атомов.

Актуальность этих исследований существенно возросла в связи с прогрессом в области оптических синтезаторов частот на основе фемтосекундных* лазеров. Методы охлаждения и локализации атомов с помощью лазерного излучения успешно развивались в течение последних двух десятилетий. При использовании «медленных» атомов устраняются или значительно уменьшаются систематические погрешности, обусловленные движением атомов, и существенно увеличивается время взаимодействия атомов с излучением, что приводит к сужению линий поглощения в спектре.

Как замедлить атом? Простейший механизм – *сила спонтанного светового давления*. При поглощении атомом лазерного излучения, направленного ему навстречу, за один цикл поглощения и последующего спонтанного излучения атом в среднем получает импульс в направлении, противоположном его движению. Иными словами, он тормозится. Несмотря на то что в одном цикле скорость меняется на незначительную величину – несколько сантиметров в секунду, в то время как первоначальные скорости составляют сотни метров в секунду, из-за высокой скорости оптических переходов (10^8 – 10^9 циклов в секунду) тепловые атомы замедляются очень эффективно.

Весьма перспективной является геометрия из шести лазерных лучей в трех взаимно перпендикулярных направлениях с отстройкой частоты в «красную» сторону относительно резонансной. Дополнительно в системе необходимо создать магнитное поле определенной конфигурации, которое также способствует локализации атомов. Такое устройство получило специальное название – *магнитооптическая ловушка* (МОЛ). Благодаря механизму спонтанного светового давления часть атомов, «загружаемых» в ловушку из термического пучка, будет замедляться, охлаждаться и локализоваться в геометрическом центре МОЛ.

Особый интерес для создания нового поколения оптических стандартов частоты представляют атомы щелочно-земельных элементов – магния, кальция, стронция и иттербия, имеющие узкие линии поглощения. В Институте лазерной физики СО РАН мы сделали упор на исследования ультрахолодных атомов магния. Высоковакуумная камера МОЛ, разработанная

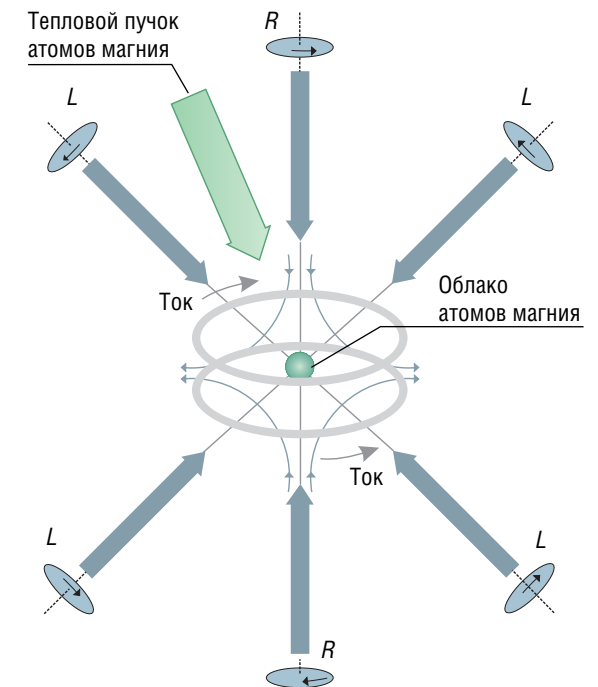


Схема магнитооптической ловушки. Токпроводящие кольца с разнонаправленными токами создают нужную конфигурацию магнитного поля. «Загружаемые» из теплового пучка атомы магния локализуются и охлаждаются в центре ловушки, где пересекаются шесть лазерных лучей с круговыми поляризациями (R – правые, L – левые)

совместно с Институтом физики полупроводников СО РАН, позволяет получать давление остаточных газов менее 10^{-8} Па. Уникальная лазерная система выдает перестраиваемое по частоте непрерывное узкополосное излучение в ультрафиолетовом диапазоне на длине волны 285 нм.

В результате экспериментов исследователям удалось получить облако из 10^5 – 10^6 атомов магния при температуре 3–4 милликельвина. Линейный размер атомного облака – около 0,5 мм. Следует подчеркнуть, что это первая в России реализация магнитооптической ловушки для щелочно-земельных атомов.

Сейчас в ИЛФ идет работа по дальнейшему охлаждению атомов магния – до 10^{-5} К. Ученые надеются достичь успеха, захватывая атомы в так называемых *оптических решетках*, т. е. в узлах или пучностях стоячей электромагнитной волны. Это позволит полностью устранить влияние остаточного движения атомов на точность разрабатываемого стандарта частоты, которая должна выйти на уровень 10^{-17} – 10^{-16} .

К. ф.-м. н. А. Н. Гончаров
(Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск)

* $1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$

Свет против звука

В Институте теоретической и прикладной механики СО РАН (Новосибирск) впервые в мире получен квазистационарный оптический разряд в воздушном сверхзвуковом потоке аэродинамической установки. Обнаружено, что взаимодействие теплового следа от разряда с ударной волной, генерируемой моделью, приводит к ослаблению ее интенсивности. Эффект может найти применение в авиации для снижения уровня звукового удара.

Возрастающий темп современной жизни и глобализация бизнеса, требующие скоростных перевозок, стимулируют исследования по созданию гражданских сверхзвуковых авиалайнеров. Разработки пассажирских сверхзвуковых самолетов второго поколения широко ведутся за рубежом и в России начиная с 90-х годов прошлого века. По единодушному мнению специалистов, основным препятствием на этом пути является экологическое ограничение на уровень звукового удара (ЗУ).

При полете в атмосфере со скоростью, превышающей скорость звука, область возмущенного течения ограничена головной ударной волной (УВ), исходящей от носовой части самолета, и хвостовой УВ, формирующейся в кормовой части. Вблизи самолета (так называемая ближняя зона) присутствуют промежуточные УВ, а также волны разрежения и сжатия, создаваемые отдельными элементами конструкции летательного аппарата. Так как возмущения, генерируемые каждой точкой его поверхности, распространяются со скоростью, близкой к скорости звука (которая меньше скорости самолета), то форма ударных волн близка к конической.

За головной УВ в результате наложения возмущений скачкообразно увеличивается давление, температура и плотность воздуха. При удалении от самолета (дальняя зона) из-за нелинейных эффектов (зависимости скорости распространения возмущений от их амплитуды) течение трансформируется таким образом, что распределение избыточного (относительно атмосферы) давления принимает N-образную форму. Наблюдателем на поверхности Земли эта N-волна воспринимается в виде одного или двух (в зависимости от размера

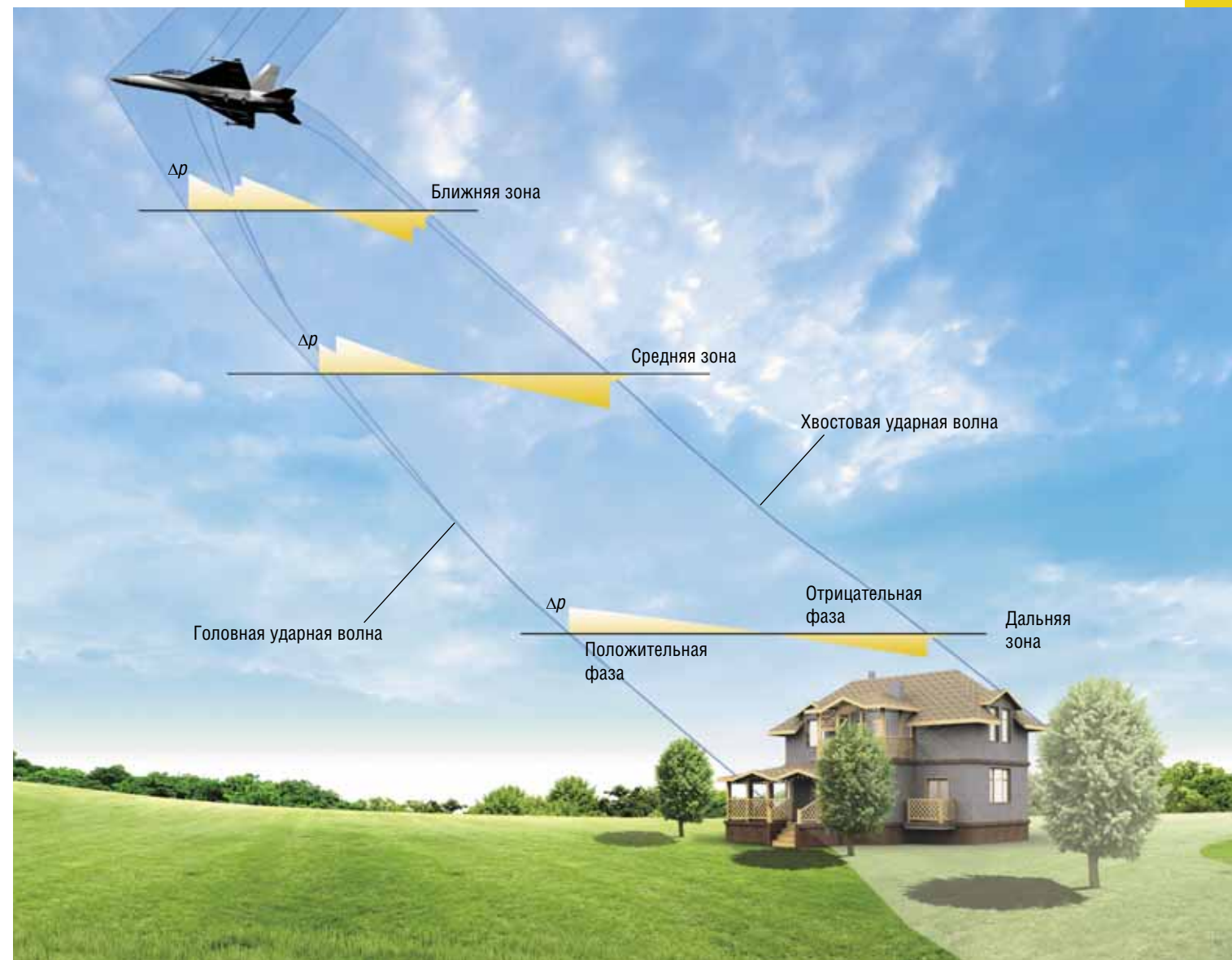
самолета и высоты полета) отдаленных взрывов. Это явление, порождаемое резкими перепадами давления на ударной волне, и носит название звукового удара.

Отрицательное воздействие звукового удара на человека и животных (психологическое и физиологическое), а также на сооружения (деструктивное) заставило установить ограничение на допустимое избыточное давление на УВ. По мере накопления информации о воздействии ЗУ на окружающую среду эта норма периодически пересматривалась. С учетом прогноза до 2012 г. (15 Па) можно констатировать, что за последние 40 лет экологические требования ужесточены практически на порядок.

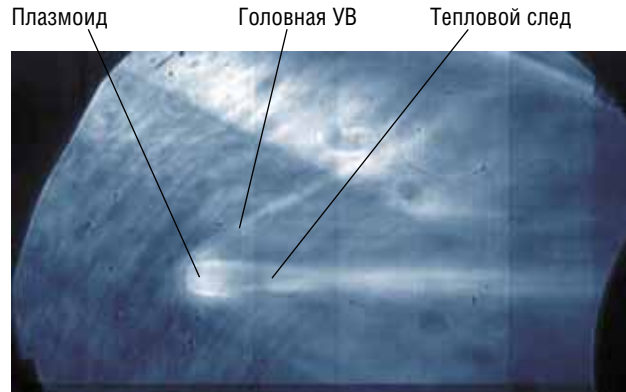
Согласно классической теории Дж. Уизема, используемой при проектировании сверхзвуковых самолетов, величина перепада давления на головной УВ определяется распределением объема и подъемной силы по длине самолета и уменьшается с увеличением высоты полета, длины самолета и уменьшением его веса. Условия, способствующие снижению уровня ЗУ, затрудняют при заданной полезной нагрузке и дальности полета обеспечение аэродинамической, а значит, и экономической эффективности самолета. А для воздушных судов массой более 100 т удовлетворить современным экологическим нормам проблематично даже с потерей экономической эффективности.

Учитывая ограниченные возможности традиционных методов, в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН ведутся исследования по снижению уровня ЗУ путем активного воздействия на возмущенное течение – с помощью подвода массы, энергии и отвода энергии вблизи летательного аппарата. В частности, в 2007 г. разработан не имеющий аналогов в мире способ управления параметрами промежуточной ударной волны путем инъекции хладагента в область ее формирования. Это позволило уменьшить перепад давления на головной УВ на 40% практически без увеличения сопротивления самолета.

В настоящее время в ИТПМ исследуется возможность ослабления ЗУ за счет взаимодействия возмущенного течения со слоем нагретого воздуха. Предварительное численное моделирование показало, что ударная



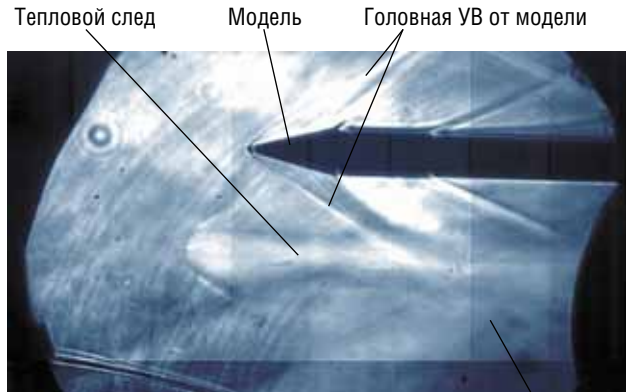
При полете самолета со сверхзвуковой скоростью область возмущенного течения ограничена головной и хвостовой ударными волнами. За головной УВ в результате наложения возмущений давление воздуха сначала скачкообразно увеличивается (положительная фаза волны ЗУ). Далее вниз по потоку под действием расширения течения, формируемого при обтекании аппарата, оно падает ниже атмосферного (отрицательная фаза волны ЗУ). На больших расстояниях от самолета (дальняя зона) течение трансформируется таким образом, что распределение давления принимает N-образную форму. На графиках показана зависимость избыточного (относительно атмосферы) давления Δp от координаты (вниз по потоку) в характерных зонах



Теневой снимок структуры течения, образующейся при взаимодействии сверхзвукового воздушного потока (число Маха $M = 2$) с плазмой, порождаемым лазерным излучением. Разработанный в ИТПМ CO_2 -лазер в режиме импульсно-периодического излучения выдавал импульсную мощность до 150 кВт. Перед областью оптического пробоя формируется ударная волна как от затупленного твердого тела. За плазмой виден след нагретого воздуха, поперечный размер которого немонотонно изменяется вниз по потоку

волна в результате прохождения слоя газа с низкой плотностью и высокой скоростью звука (обеспеченных нагревом) может существенно ослабляться при определенном соотношении температур в слое и потоке.

Эксперименты по воздействию теплового слоя на УВ, генерируемую модельными объектами, проводились на малогабаритной аэродинамической установке, где создавался сверхзвуковой воздушный поток поперечным размером 100 мм. Тепловой слой формировался излучением газового CO_2 -лазера, разработанного в ИТПМ, со средней мощностью до 4,5 кВт (ускоренные темпы развития лазерной и СВЧ-техники позволяют рассматривать эти устройства как наиболее перспективные бортовые источники энергии). Подвод энергии излучения в сверхзвуковой поток воздуха возможен в области *оптического пробоя*. Этим термином принято обозначать переход газообразного вещества в состояние плазмы под воздействием электромагнитного поля оптической частоты. Для реализации эффекта необходима интенсивность лазерного излучения порядка $10^9 - 10^{10}$ Вт/см² за время 0,3–1 мкс. Обеспечить такие экстремальные параметры пока возможно только в режиме повторяющихся (с частотой 80–100 кГц) импульсов сфокусированного излучения. При этом в воздушном потоке возникают сгустки плазмы (*плазмиды*) с температурой 20–30 тыс. градусов. За плазмой образуется тепловой след.



Теневой снимок структуры течения при взаимодействии области оптического пробоя с возмущенным течением, генерируемым моделью в виде конуса на цилиндре. Наблюдается прошедшая тепловой слой УВ от модели и заметное изменение структуры потока за падающей УВ. Течение за ударной волной при входе в тепловой слой переориентируется по направлению набегающего потока

В первых экспериментах внимание исследователей было сосредоточено на изучении особенностей структуры течения, формирующейся при взаимодействии с плазмой потока воздуха, скорость которого в 2 раза превышала скорость звука.

Следующим важным этапом работы стал анализ взаимодействия области оптического пробоя (разряда) с возмущенным течением, генерируемым моделью в форме конуса. В области взаимодействия на фоне нестационарного течения фиксировались моменты исчезновения УВ, прошедшей тепловой слой. Наблюдения велись с помощью оптического теневого прибора и скоростной видеокамеры.

Наблюдаемые изменения структуры течения указывают на явное ослабление интенсивности головной УВ, генерируемой моделью. Попутно отметим, что согласно оценкам ударная волна от самого плазмиды уже при небольших удалениях существенно слабее, чем от модели.

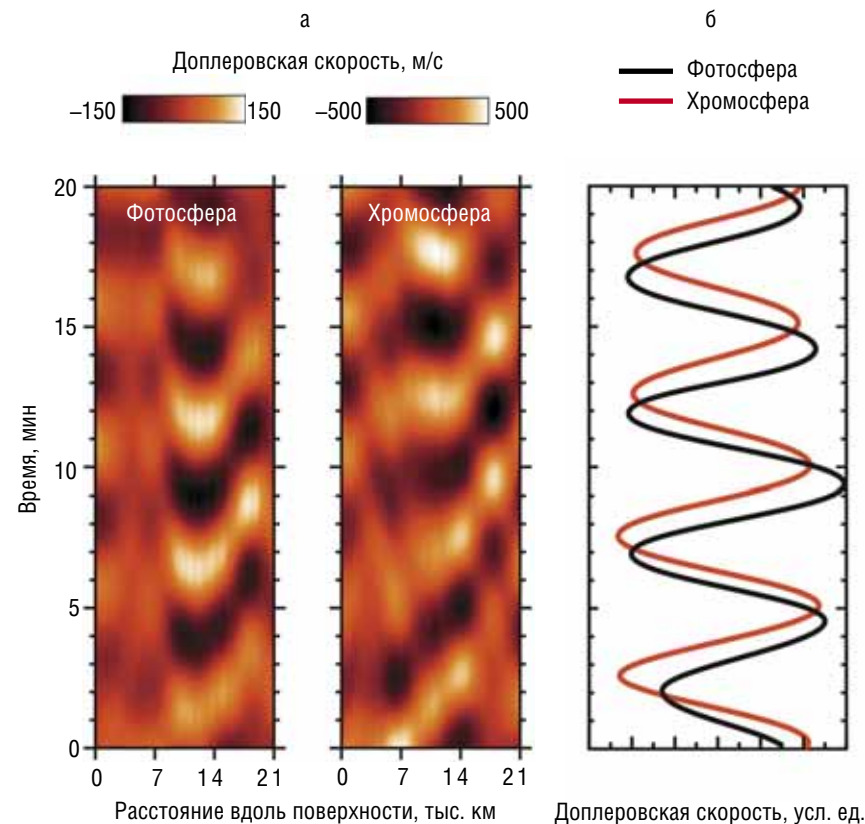
Сейчас исследования направлены на получение количественной информации об эффективности воздействия теплового следа плазмиды на параметры ударной волны. Для этого планируется выполнить прямые измерения распределения давления в воздушном потоке.

К. т. н. В. Ф. Чиркашенко
(Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск)

Волны в корональных дырах на Солнце

Группе ученых из Института солнечно-земной физики СО РАН (Иркутск) удалось обнаружить распространяющиеся плазменные волны в основании солнечных корональных дыр. Усилиями нескольких российских научных коллективов с участием зарубежных коллег показано, что фотосферные волны проникают в корону Солнца благодаря параметрическому резонансу этих волн с собственными колебательными модами магнитных структур короны. Результат признан важнейшим за 2008 г. по секции «Солнце» Астрономического совета РАН.

Нагрев *солнечной короны* – самой внешней оболочки нашего дневного светила – давняя проблема астрофизики. То же можно сказать о большинстве звездных атмосфер. Твердо установлено, что видимая невооруженным глазом поверхность Солнца (*фотосфера*) имеет температуру около 5800 К, тогда как верхняя *хромосфера* – слой, расположенный на 2–3 тыс. км выше, – нагрета до 20 000 К, а в *короне* температура отдельных участков достигает уже 4 млн градусов. Каким же образом относительно «холодная» фотосфера разогревает вышележащие слои солнечной атмосферы?



Второй закон термодинамики исключает возможность прямого теплопереноса из фотосферы в более горячую корону. Это означает, что транспортировка энергии осуществляется другим способом.

В настоящее время рассматриваются два возможных механизма, претендующих на роль «поставщика» энергии в корону. Оба механизма могут действовать как самостоятельно, так и совместно. Первый – магнитные поля, пронизывающие солнечную атмосферу до больших высот и способные накапливать и высвободить значительную энергию. Второй – *плазменные волны*, порождаемые конвективными движениями в подфотосферных слоях и другими динамическими процессами. В зависимости от преобладающей восстанавливающей силы (силы, стремящейся вернуть плазму в состояние равновесия) волны могут быть звуковыми (волны упругости), гравитационными или магнитными. Часто эти силы действуют одновременно, и мы имеем дело с самыми настоящими волнами-кентаврами: магнитозвуковыми, акустогравитационными и т. д.

Чтобы изучать колебательно-волновые процессы на Солнце, требуются крупные солнечные телескопы, оснащенные высокочувствительными спектрополяриметрами. Согласно *эффекту Доплера* движения излучающих сгустков плазмы от наблюдателя и к наблюдателю соответственно увеличивают или уменьшают длину волны спектральной линии, смещая ее от начального положения (чем больше скорость, тем больше смещение). Аппаратура, которой располагает Институт солнечно-земной физики в Иркутске, способна зарегистрировать вариации, составляющие менее одной десятиллионной от длины волны излучения. Выполняя синхронные измерения на нескольких специально подобранных спектральных линиях, можно получать высотные разрезы доплеровской скорости в интервале высот фотосфера–хромосфера (который составляет около 2000 км) для объектов солнечной атмосферы с разной конфигурацией магнитного поля.

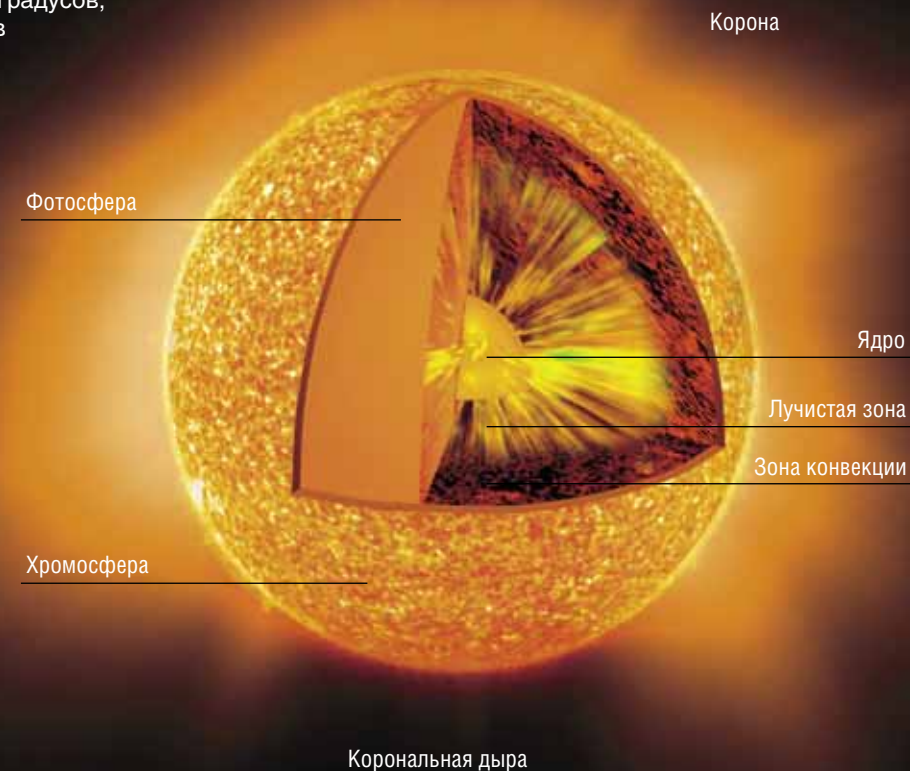
Наиболее крупные и интересные среди этих объектов – *корональные дыры* (КД).

Своим названием корональные дыры обязаны тому, что в рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом диапазоне они выглядят как темные провалы в яркой короне. Их связывают с крупномасштабными магнитными структурами, имеющими открытую конфигурацию магнитного поля, т. е. такую, при которой силовые линии фотосферного магнитного поля перпендикулярны поверхности и сохраняют это направление при выходе во внутреннюю корону. Кстати, играющий столь важную для Земли роль *солнечный ветер* – поток заряженных частиц от Солнца – истекает именно из КД.

Для детального изучения отдельных колебательных мод мы применили методы частотной фильтрации, позволяющие из шумоподобной смеси квазистационарных движений и разнообразных колебаний выделять интересующие нас составляющие и с помощью обратного преобразования восстанавливать их исходное пространственно-временное распределение. Оказалось, что такая операция особенно полезна для выявления распространяющихся волн. Нам удалось обнаружить и зарегистрировать убедительные проявления распространяющихся вверх волн непосредственно в основании корональных дыр.

На присутствие волновых движений такого рода указывают повторяющиеся наклонные полосы на пространственно-временных диаграммах доплеровской скорости. Расстояния между полосами вдоль оси времени соответствуют периоду колебаний, а угол между полосой и осью времени связан с горизонтальной проекцией скорости распространения (чем больше угол, тем больше скорость). Скорость распространения волны из фотосферы в хромосферу определялась по среднему времени запаздывания сигналов доплеровской скорости. В итоге выяснилось, что доминируют волны с 5-минутным периодом (*фундаментальная фотосферная мода*), хотя нередко наблюдались и ос-

Общепринятая схема строения Солнца. Прямым наблюдениям доступны только внешние слои, начиная с фотосферы. Температура фотосферы – 5800 К, хромосферы – 10–20 тыс. градусов, короны – 1–4 млн градусов



цилляции с периодом 10–15 минут. Измеренная фазовая скорость составила 40–45 км/с для экваториальной КД и 70–80 км/с – для полярной.

Усилиями нескольких научных коллективов (ИПФ РАН, ИСЗФ СО РАН, ГАО РАН, ННГУ, Технический университет Хельсинки) с привлечением данных радиодиапазона было показано, что проникновение фотосферных волн в корону Солнца возможно в результате *параметрического резонанса* этих волн с собственными колебательными модами магнитных структур короны. И как часто бывает, новых вопросов возникает больше, чем ответов на уже поставленные.

В будущем предстоит выяснить, какая часть энергии плазменных волн расходуется на нагрев короны, а какая – уносится солнечным ветром? Не играют ли корональные дыры в этом случае роль своеобразного энергетического клапана, регулирующего степень нагрева короны? Можно надеяться, что полученный в 2008 г. совместный грант РФФИ и Королевского астрономического общества Великобритании, объединяющий силы российских экспериментаторов и английских теоретиков, поможет продвинуться в решении этой проблемы.

Д. ф.-м. н. Н. И. Кобанов, А. А. Скляр
(Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск)

Нано для космоса

В №2 за 2007 г. журнал «Наука из первых рук» сообщил об открытии томскими учеными эффекта «шахматной доски» в распределении механических напряжений на границе раздела двух сред. Полтора года спустя на основе этого эффекта специалисты Института физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск) совместно с Исследовательским центром им. М.В. Келдыша (Москва) разработали наноструктурные теплозащитные покрытия, предназначенные для ракетно-космической техники.

Современным конструкциям, представляющим собой сложные функциональные системы, зачастую приходится работать в экстремальных условиях. В ракетно-космической отрасли эти условия – суперэкстремальные.

Не существует природных материалов, которые способны выдерживать высокие температуры плазменных потоков. А ученые и инженеры такие материалы создают. Правда, срок их службы очень ограничен. И максимально увеличить его, а также поднять еще выше температуру плазмы, которая определяет тягу ракеты, – задача актуальная.

Какие требования предъявляются к материалу ракетного сопла? С одной стороны, он должен эффективно отводить тепло плазменной струи, чтобы конструкция не расплавилась, с другой – не должен непосредственно соприкасаться с плазмой. В качестве материала сопла обычно используется высокотеплопроводная медь; кроме того, предусмотрена система внутреннего водоохлаждения. Наружную же поверхность сопла покрывают теплозащитной керамикой. Вот здесь-то материаловеды и сталкиваются с целым комплексом проблем на стыке физики, механики, химии, наноматериаловедения.

Из-за различия коэффициентов термического расширения меди и керамики на границе их раздела возникает очень сложное напряженно-деформированное состояние. В керамике образуется сетка трещин и происходит ее частичное отслоение. Это резко ограничивает срок службы ракеты. А ведь разрабатываются программы межпланетных полетов, ракеты многоразового использования; остро стоит вопрос экономичности двигателей, их коммерческой эффективности.

Ответы на актуальные вопросы современного материаловедения дает развиваемая в СО РАН новая наука – физическая мезомеханика. Ее методы позволяют

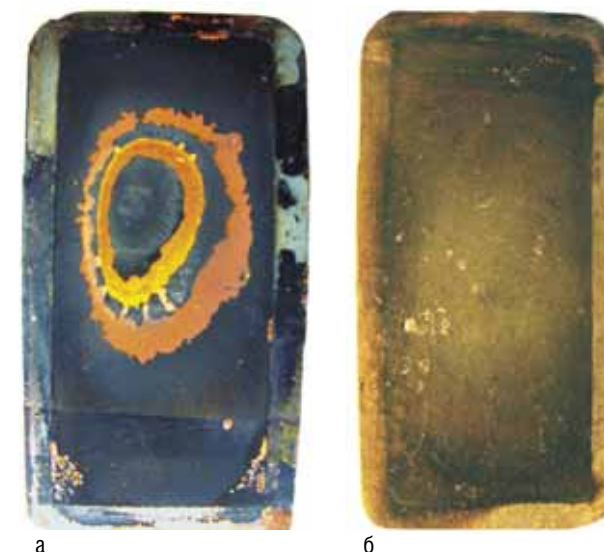
рассчитывать механические напряжения на границе разнородных сред. Активное исследование эффекта «шахматного» распределения механических напряжений, открытого два года назад, привело к заключению принципиальной важности: теплозащитные покрытия, наносимые на сопла ракет, должны быть наноструктурными.

Принято считать, что отслаивание покрытия от подложки связано со слабой адгезией (от лат. *adhaesio* – прилипание). Это действительно серьезная, но не самая главная проблема. Расчеты показывают, что сетка трещин в керамическом покрытии развивается по краям клеток «шахматного» распределения растягивающих и сжимающих нормальных напряжений на границе раздела. Последующее отслоение покрытия происходит в клетках, испытывающих растягивающие нормальные напряжения. Их и нужно снижать. Как это делать, отвечает физическая мезомеханика.

Не вдаваясь во все детали, дадим главный вывод: покрытия обязательно должны быть многослойными и иметь наноструктуру. Это обеспечивает минимальную амплитуду модуляции нормальных и касательных напряжений на всех границах раздела многослойного покрытия, что позволяет кардинально улучшить его эксплуатационные характеристики.

Следующая, не менее важная, проблема – как при высоких температурах сохранить в покрытии наноструктуру? Стабильное твердое тело по своей природе стремится быть совершенным кристаллом. Наноструктура не свойственна твердому телу и при высокоэнергетическом воздействии перестраивается в монокристалл. Физическая мезомеханика позволяет решить и проблему стабилизации наноструктуры. Достигается это путем выделения в структуре наночастиц тугоплавких соединений определенного типа.

В Институте физики прочности и материаловедения были разработаны нанотехнологии послойного осаждения покрытия с бомбардировкой каждого слоя пучком ионов. Оказалось, что при условии предварительного наноструктурирования ионным пучком подложки можно добиться значительного уменьшения среднего размера зерна в покрытии – до 10–20 нм. При этом твердость, износостойкость и термоциклическая стойкость покрытия многократно повышаются.



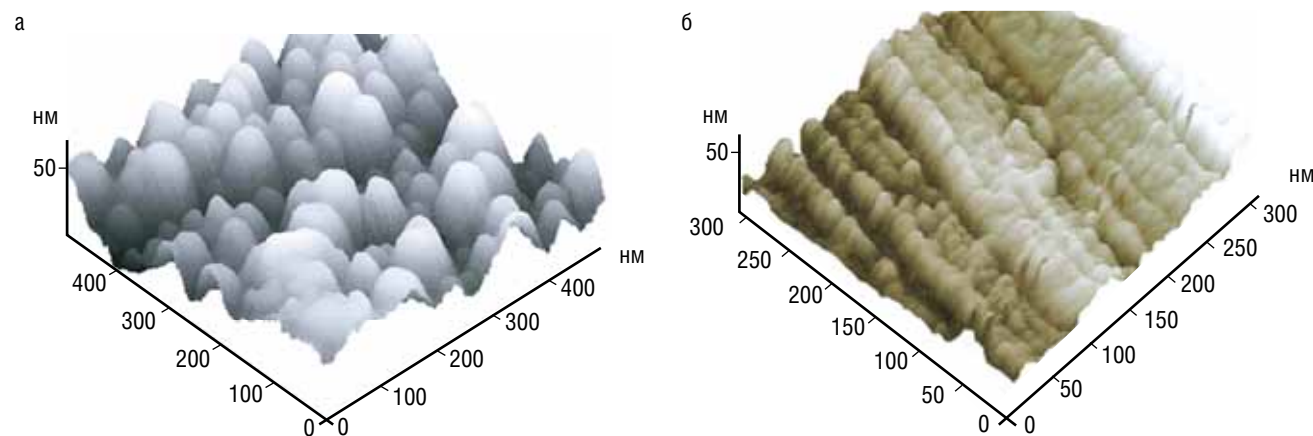
Образцы после огневых испытаний. Хорошо видны кольцевые отслоения стандартного теплозащитного покрытия (а); нанопокрyтие сохраняет свою структуру неповрежденной (б)

Был определен оптимальный химический состав многокомпонентных наноструктурных покрытий и отработана технология формирования в них контролируемого распределения фаз путем поочередного осаждения-бомбардировки слоев в едином вакуумном цикле.

Огневые испытания новых покрытий проводились в Центре Келдыша на плазмотроне мегаваттного класса. Образец с наноструктурным многослойным покрытием прошел ряд огневых циклов. В условиях осевого воздействия мощной плазменной струи стандартное теплозащитное покрытие испытывало кольцевые отслоения. Наноструктурное же покрытие, разработанное комплексным коллективом ИФПМ и Центра Келдыша, сохраняло свою структуру и теплозащитные свойства.

Над чем работает коллаборация Томска и Москвы в настоящее время? В научном плане обнаружены новые эффекты самоорганизации структур многослойных покрытий при высоких температурах, что позволяет прогнозировать создание «умных покрытий» (*smart coatings*). Это принципиальный этап в разработке материалов нового поколения. Что касается технологического аспекта, то необходимо отработать технологию нанесения таких покрытий на реальные конструкции ракетно-космических комплексов. Задачи, безусловно, сложные, но главное – заложен прочный фундамент дальнейших научных поисков.

Академик РАН В.Е. Панин, к.ф.-м.н. В.П. Сергеев
(Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск)



Морфология покрытий TiAlN, осажденных методом вакуумного ионно-плазменного напыления: а – по стандартной технологии; б – с использованием нанотехнологии. Наблюдается ярко выраженный эффект уменьшения размера зерна. Атомно-силовая микроскопия



Астрономия и общество

В ознаменование 400-летия изобретения телескопа 2009 год объявлен Ассамблеей ООН Международным годом астрономии. Центральным мероприятием в России стала конференция «Астрономия и общество», проведенная 23–27 марта 2009 г. в Москве.

Всероссийская конференция представляла собой редкую в наше время попытку ученых рассказать широкому кругу людей об открытиях в области астрономии и астрофизики, сделанных в России и в мире. Эта попытка отчасти удалась. Ярким событием стали обзорные лекции таких известных астрономов, как А. М. Черепашук, И. Д. Новиков, Н. С. Кардашев, Г. А. Жеребцов, Ю. Ю. Балегга. В их докладах в доступной форме излагалась эволюция Вселенной, проблемы обнаружения и объяснения новых форм материи и энергии, велся разговор о динамике космической погоды, обсуждалась мировая интеграция научных сил и перспективы астрономии в России. Надо сказать, что на обзорные лекции вход был свободный, и их посетило довольно большое количество слушателей, что, на мой взгляд, являлось одним из главных достижений конференции.

В первый день прозвучала масса приветственных слов от представителей власти. Но порой государственные чиновники демонстрировали полное незнание положения дел даже в нынешней системе образования, не говоря уже о проблемах в научных исследованиях. Так, при словах представителя аппарата Совета Федерации: «Надо выделить больше часов на сложные темы по астрономии в школе» – слушатели оживились, а некоторые просто рассмеялись, ведь предмета «астрономия» уже давно нет в обязательной программе общеобразовательной школы.

Однако эта ненормальная ситуация, по-видимому, изменится. Причиной тому послужили многочисленные обращения в Министерство образования и к Президенту РФ различных астрономических организаций, в том числе конференции «Солнечная корона и физика плазмы», которая проходила 2–3 августа 2008 г. в новосибирском Академгородке. В обращении подчеркивалась несомненная роль астрономии в вовлечении молодежи в техническое и научное творчество через мотивацию, создаваемую легче всего на интересе к звездному небу. Сейчас уже очевидно (и это подтверждают результаты опросов), что в постсоветский период уровень астрономических знаний в обществе упал. На одном из «круглых столов» московской конференции представитель Минобрнауки в свою очередь посетовал: «Астрономию в школе часто ведут либо физики, либо математики, давая в эти часы свой предмет... Нет преподавателей, нет оборудования. Нужно это менять, но под силу ли это астрономическому сообществу?»

В результате обсуждений решили, что под силу. Предмет будет снова вводиться в программу средней школы. В проект резолюции всероссийской конференции было передано и предложение обсерватории Новосибирского университета об использовании телескопов с удаленным доступом для целей школьного образования. Естественно, при соответствующей поддержке такого инструментария и проверке методической состоятельности коллективов обсерваторий. В настоящее время подобных астрофизических комплексов много, но решаемые ими задачи не вписываются в простые и нужные темы школьного курса астрономии.

Некоторые выступления создавали у участников ощущение, что ты присутствуешь на заседании экспертного совета, где заслушивается обоснование на выделение финансирования. Особенно это чувствовалось во время доклада об астероидной опасности. А между тем вероятность столкновения с Землей астероида Апофис в 2036 г. составляет 1/45 000. Вероятность ненулевая, и теоретически Апофис мог бы вызвать при ударе о сушу взрыв мощностью 500 мегатонн, а при падении в океан – катастрофическое цунами. Международная Ассоциация исследователей космоса считает, что через 10–15 лет ООН предстоит решить, какие конкретные действия необходимы для предотвращения угрозы со стороны комет и астероидов. В конце прошлого года в штаб-квартире ООН был распространен доклад с красноречивым названием «Астероидная угроза: призыв к глобальному взаимодействию». Представляется, что защита Земли есть именно глобальная международная задача, и поэтому разрозненные усилия отдельных стран малоэффективны.

Большой интерес на конференции вызвали лекции с упоминанием красивых и увлекательнейших теорий о «кротовых норах» (быстрых туннелях в другие галактики). По этому поводу А. А. Старобинский и М. М. Мингалеев, ведущие российские специалисты в области теории и практики исследований объектов, которые неоднозначно трактуются астрономами и физиками, выразили здоровый пессимизм, высказавшись в том смысле, что непонятным явлениям следует искать наиболее простые объяснения. В принципе, астрономы и физики по-разному оценивают эффективность тех или иных методов научного познания, в частности в физике высоких энергий. Астрономы, например, считают оптимальным изучение космических частиц, а физики – исследования рукотворного микромира, рождаемого в установках. Истина же, наверное, в том, что оба подхода дополняют друг друга.

Мой доклад был посвящен мероприятиям, связанным с полным солнечным затмением 1 августа 2008 г., «столицей» которого по праву считался Новосибирск. Двухчасовая интернет-трансляция этого редкого небесного явления, которая с таким качеством картинки (и такой длительности) проводилась в России впервые, прошла успешно. Несмотря на то что в агентстве «Роснаука» проект не был поддержан, мы с коллегами все-таки решили провести эту трансляцию на собственные средства совместно с сайтом ngs.ru и при поддержке



В течение двух часов велась с крыши НГУ интернет-трансляция солнечного затмения 1 августа 2008 г. За ходом небесного явления следили пользователи 30 стран, общий трафик составил 3 Тб. Видеосигнал с трех камер использовался новосибирским телевидением в специальной передаче, посвященной затмению. *Фото А. Зайцева*

РИА «Новости» (оптоволокну предоставил департамент связи и информатизации мэрии). По данным интернет-статистики, общий трафик составил огромную цифру – 3 Тб, за ходом затмения следили пользователи Сети из 30 стран. Совместно с областным телевидением (студия ОТС) мы организовали и телетрансляцию. По информации сайта ngs.ru, августовское затмение было названо новосибирцами самым важным событием года, которое «затмило» даже негативные последствия экономического кризиса.

В заключение этих кратких заметок хочу выразить надежду, что в Международный год астрономии небольшой обсерватории НГУ удастся провести для жителей России (при условии получения спонсорской поддержки или гранта) запланированную онлайн-трансляцию шестиминутного полного солнечного затмения, которое произойдет 22 июля в Китае.

*А. Р. Нестеренко,
заведующая астрофизическим комплексом
Новосибирского государственного университета,
участница конференции*

Окольцованный Байкал

С высоты «космического полета» на весеннем байкальском льду иногда можно увидеть огромные темные кольца диаметром в несколько километров. Эти необычные структуры – не очередные происки инопланетян, а природное явление, механизм которого изучается в рамках междисциплинарного проекта Президиума РАН



Кольцевые ледовые структуры вблизи п-ова Святой Нос и в западной части Южного Байкала. 19 апреля 2009 г. Данные прибора MODUS спутника Terra. Фото из архива Сибирского отделения ФГУНПП «Росгеолфонд»

Ледовый покров Байкала стал объектом наблюдений еще во второй половине XVII в. По сведениям Николая Спафария, первого русского посла в Китае и исследователя Сибири, «... зимнею порою мерзнуть Байкал начинающе около крещеньева дни и стоит до мая месяца около николина дни, а лед живет в толщину по сажени и больше, и для того по нем ходят зимнею порою санями и нартами, однакоже зело страшно, для того, что море отдыхает и разделяется надвое и учиняются щели сажени в ширину по три и больше, а вода из него не проливается по льду, а вскоре опять сойдется вместе с великим шумом и громом, и в том месте учинится будто вал ледяной; живет под ледом шум и гром великий, будто из пушки бьет... наипаче меж острова Ольхона и меж Святого Носа, где пучина большая» (Спафарий, 1882, с. 120).

Систематические исследования байкальского ледового режима начались в 1869–1876 гг., когда в п. Култук появились ссыльные Б. Дыбовский и В. Годлевский, участники польского восстания 1863 г. Они подробно описали вскрытие и замерзание Байкала, впервые установив зависимость между толщиной льда и мощностью лежащего на нем снегового покрова; исследовали торосистость льда, образование ледовых трещин и щелей. В их работах, опубликованных в трудах Восточно-Сибирского отдела Императорского Русс-

кого Географического общества, содержались также сведения о том, что в некоторых местах озеро в зимний период не замерзало.

Исследования ледового покрова и ледовых явлений были продолжены Байкальской лимнологической станцией Академии наук, образованной в 1925 г. В результате были обнаружены необычные формы ледового покрова, характерные только для Байкала. Например, «сопки» – конусовидные ледяные холмы высотой до 6 м, полые внутри. Внешним видом они напоминают ледяные шатры, «открытые» в противоположную от берега сторону. «Сопки» могут располагаться по отдаленности, а иногда даже образовывать миниатюрный «горный хребет» (Цуриков, 1939). Механизм образования «сопок», а также некоторых других типично байкальских форм льда до сих пор неизвестен.

Сегодня в руках исследователей имеются спутниковые данные, позволяющие получать недоступную ранее информацию о становлении и разрушении ледового покрова всего озера. Весной 2003 г. на снимках, сделанных из космоса, ученые из Лимнологического института СО РАН обнаружили необычную кольцевую структуру на поверхности льда в районе м. Крестовский (Средний Байкал). Анализ спутниковой информации за предыдущие годы показал, что подобная структура существовала в этом же месте и в апреле 1999 г.



Для обследования льда ученые использовали катер на воздушной подушке «Хиус». Ледовый керн, взятый на расстоянии 2 км от центра кольцевой структуры, оказался весь пронизан микротрещинами. Апрель 2009 г.

В ходе дальнейших исследований было установлено, что круговые структуры проявляются на поверхности озера перед разрушением льда достаточно часто. Так, в районе м. Крестовский подобная структура была зарегистрирована в 2005 г. и 2008 г.; в северной оконечности пролива Малое Море – в 2004 г., 2005 г. и 2009 г.; в западной части Южного Байкала – в 2008 г. и 2009 г. и т. д. В последние годы отмечен рост числа круговых структур, регистрируемых в течение одного года, а также их более раннее проявление.

Кольцевая структура в Южном Байкале в 2009 г. проявилась 4 апреля, и уже через три дня она была обследована учеными из Лимнологического института и Института динамики систем и теории управления СО РАН. Оказалось, что толщина льда в центре кольцевой структуры и за ее пределами практически не отличалась и составляла около 70 см. Однако она резко уменьшалась (до 43 см) в радиусе 2 км от центра «кольца». Всю ледовую толщу здесь пронизывали вертикальные микротрещины.

В «кольце» были зарегистрированы и другие нетипичные явления. Так, температура поверхностного слоя воды подо льдом в центральной части кольцевой структуры оказалась на 0,5° С выше, чем за ее пределами. Кроме того, здесь была зарегистрирована максимальная скорость течения (около 6 см/сек).

Что же служит причиной появления столь необычных ледовых структур?

Они возникают благодаря подъему глубинных вод и повышению температуры поверхностного слоя воды в центральной части кольцевой структуры. В результате образуется антициклоническое (по часовой стрелке) течение.

В зоне, где течение достигает максимальных скоростей, усиливается вертикальный водообмен, что приводит к ускоренному разрушению ледового покрова. Темные круги, заметные на космических снимках, – это те самые круговые области, где толщина ледового покрова минимальна, а сам лед более насыщен водой.

Подъем глубинных вод может происходить из-за извержений грязевых вулканов на дне озера. Однако эту гипотезу еще предстоит доказать. В настоящее время комплексные исследования механизма образования кольцевых структур на Байкале ведутся в рамках проекта Президиума РАН, в котором участвуют лимнологи, математики и физики из четырех институтов Сибирского отделения.

Уникальные байкальские ледовые круги далеко не последняя загадка, которую нам задает самое большое пресноводное озеро планеты.

К. г. н. Н. Г. Гранин
(Лимнологический институт СО РАН, Иркутск)
Фото Р. Ю. Гнатовского

СВИНОЙ ГРИПП

СПИД, SARS, птичий и свиной грипп...

Чтобы разобраться во всех новых инфекциях, с которыми человечество столкнулось в последние десятилетия, нужно обладать определенными знаниями по вирусологии. И сегодня специалист-вирусолог знакомит нас с новым вариантом гриппа A/H1N1

Что представляет собой новый вирус гриппа и что обозначает его аббревиатура – H1N1?

Вирусы гриппа типа А классифицируют по типам их поверхностных белков – *гемагглютинина* и *нейраминидазы*. Поэтому их обозначают так называемой антигенной формулой вида HmNk, где m и k – номера субтипов этих белков.

Основные природные хозяева вирусов гриппа А – водоплавающие птицы, но некоторые из субтипов вируса периодически циркулируют среди других позвоночных – свиней, лошадей и морских млекопитающих. И конечно же, среди людей.

Нынешний свиной грипп имеет известный субтип H1N1, но при этом является его новым гибридным вариантом, с которым специалисты пока еще разбираются. Характерно, что появился он в результате *реассортации* («перемешивания» генов) нескольких штаммов вируса гриппа в густонаселенной Мексике (или в не менее густонаселенном американском штате Калифорния, что тоже не исключается).

Насколько новый штамм опасен для человека?

На 24 июня картина заболеваемости этим гриппом была следующей: всего зарегистрировано и подтверждено точными методами клинической диагностики 55867 случаев, из которых 238 закончились смертью. Таким образом, смертность составила менее 0,5%.

При этом более 21 тыс. случаев заболевания выявлено в США, где летальных исходов всего 87. Отсюда следует, что уровень смертности в США еще меньше и вполне сопоставим со смертностью от обычного сезонного гриппа. С учетом того, что в США смертность от гриппа всех типов составляет 35–40 тыс. человек в год, то новый вирус добавил к этой цифре менее 0,05%.

Итак, уровень смертности от новой разновидности вируса гораздо меньше, чем от птичьего гриппа подтипа H5N1, проявившего себя в 1997 г., а затем в 2004–2009 гг. в основном в Азии. Тогда умерло почти половина заболевших. Однако уровень заболеваемости свиным гриппом и степень его заразности оказались намного выше, чем в случае птичьего гриппа. Поэтому

Субтипы поверхностных белков	Птица	Свинья	Курица
H1			
H2			
H3			
H4			
H5			
H6			
H7			
H8			
H9			
H10			
H11			
H12			
H13			
H14			
H15			
H16			
Нейраминидаза	N1	N1	N1
	N2	N2	N2
	N3	N3	N3
	N4	N4	N4
	N5	N5	N5
	N6	N6	N6
	N7	N7	N7
	N8	N8	N8
	N9	N9	N9

Основным природным резервуаром гриппа типа А являются птицы. Именно у них в отличие от млекопитающих встречаются штаммы вируса, несущие все известные подтипы поверхностных белков – *гемагглютинина* и *нейраминидазы*. Человек и свинья достаточно близки генетически и инфицируются схожим спектром вирусных штаммов

ВОЗ решила поднять оценку уровня угрозы пандемии гриппа с 5 до 6 (по шестибальной шкале).

Какая работа проводится сейчас по изучению вируса?

Наиболее интенсивно новый вирус изучают в центрах по контролю и предотвращению заболеваний – главной правительственной организации по диагностике и борьбе с болезнями в США (Атланта, штат Джорджия).

Именно американские вирусологи установили, что данный вирус является реассортантом нескольких штаммов вируса гриппа. Согласно их исследованиям многие образцы нового вируса, взятые от разных пациентов, оказались устойчивы к *амантадину* и *ремантадину*. Эти препараты являются ингибиторами вирусного белка M2, который формирует ионные

В вопросах и ответах

каналы в липидной мембране возбудителя. Много лет амантадин и ремантадин успешно используются для профилактики и лечения обычного сезонного гриппа, но в данном случае они оказались неэффективны.

К счастью, выяснилось, что пока вирус чувствителен к *тамифлю* и *озелтамивиру* – препаратам, ингибирующим нейраминидазу, являющуюся одним из важнейших вирусно-специфических ферментов. Но судя по некоторым данным, новый вирус может приобрести устойчивость и к этим средствам.

Образцы вируса уже находятся в распоряжении и российских ученых из НИИ гриппа РАМН (Санкт-Петербург), НИИ вирусологии им. Д.И. Ивановского РАМН (Москва) и ГНЦ вирусологии и биотехнологии «Вектор» (Новосибирск). Начаты их исследования с целью совершенствования специфических диагностических средств, выявления степени защищенности людей, уже привитых сезонной вакциной, и, конечно, по разработке вакцины.

Помимо этого, российские ученые обязательно проверят полученные вирусы на лекарственную устойчивость, поскольку у нас имеются и свои разработки в области противовирусных препаратов. Не исключено, что и отечественные средства смогут эффективно подавлять развитие этого вируса.

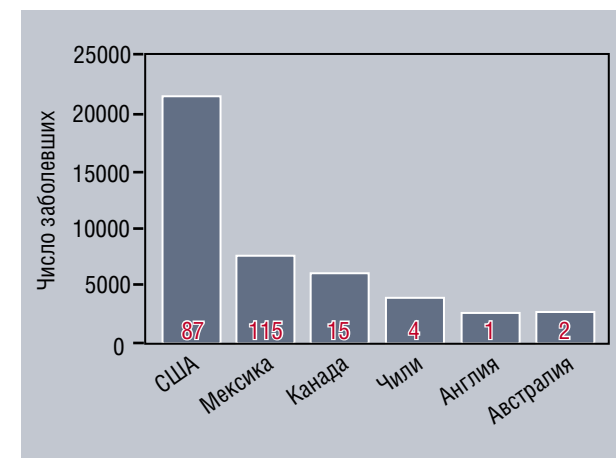
Реально ли создать вакцину против гриппа A/H1N1?

Разработать вакцину против нового вируса гриппа вполне реально. Это сейчас является одним из важнейших направлений российских исследований.

Например, специалисты НИИ гриппа РАМН могут создать подобную вакцину за несколько месяцев традиционными и хорошо апробированными в институте методами.

Кроме того, генно-инженерными методами и методами «обратной генетики» вакцину можно сделать и без исходного образца «свиного» вируса – используя данные по нуклеотидной последовательности его генома. Специалистам новосибирского центра «Вектор» такая задача по плечу. Для этого требуется лишь целевое финансирование в объеме 15–20 млн руб. на создание генно-инженерной конструкции и примерно такая же сумма – на получение и характеризацию будущего кандидатного вакцинного штамма.

Нужно заметить, что в США доля населения, вакцинированного от обычного сезонного гриппа, гораздо выше, чем в Мексике. Вероятно, именно этим можно объяснить весьма значительную разницу в смертности в этих двух странах, хотя такой вывод нуждается в тщательной проверке.



Список стран, наиболее пострадавших от гриппа A/H1N1, возглавляют страны Северной Америки. Красными цифрами указано число смертей. Данные на 24 июня с сайта ВОЗ: www.who.int/en

Насколько велика вероятность всемирной пандемии и того, что грипп дойдет до Сибири?

Едва успев появиться, новая разновидность гриппа попала практически на все континенты.

Проникновение ее на территорию России с самого начала было весьма вероятно, если учитывать значительную активность наших туристов и вообще всех граждан России. На 2 июня мы имели три лабораторно подтвержденных случая заболевания (на 24 июня это число не изменилось). Поэтому все усилия и меры, предпринимаемые сейчас Роспотребнадзором и другими органами здравоохранения и ветеринарного надзора, оправданы.

Что касается аналогичных усилий в США, то там также делается все возможное, чтобы заглушить эпидемию. И это удастся, судя по динамике процесса. В странах, где случаи этого вида гриппа редки, вероятность развития эпидемии минимальна.

В настоящий момент жесткие меры относительно ограничения международных поездок, в принципе, можно и ослабить. В то же время целесообразно продолжать проявлять повышенное внимание к физическому состоянию лиц, приезжающих в Россию из стран, где это заболевание выявлено.

Чл.-кор. РАН С.В. Нетесов,
проректор по научной работе
Новосибирского государственного университета

ЯДЕРНАЯ ТОПКА ЗЕМЛИ

В. Ф. АНИСИЧКИН, А. А. БЕЗБОРОДОВ

Общеизвестно, что Солнце и другие звезды черпают свою колоссальную энергию из пылающего в их недрах «термоядерного котла». Но и относительно холодная Земля излучает тепла заметно больше, чем можно было бы предположить на основе таких широко распространенных в природе процессов, как, например, естественный радиоактивный распад. Некоторые ученые считают, что причина этого кроется в работе гигантского атомного реактора в земных глубинах. Только в нашем геореакторе происходит не термоядерный синтез, как в звездах, а цепные реакции деления



АНИСИЧКИН Владимир Федорович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск). Область научных интересов: физика взрыва, космогония. Автор и соавтор 75 научных работ



БЕЗБОРОДОВ Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-энергетического института (Обнинск). Область научных интересов: физика ядра, математическое моделирование. Автор и соавтор около 60 научных работ

В 1972 г. на заводе во Франции, производящем обогащенное ядерное топливо, случилось ЧП. До сих пор считалось, что изотопный состав природного урана повсюду на Земле одинаков. Однако в одной партии исходного сырья обнаружилось заметно меньше урана-235, чем обычно. Комиссариат по атомной энергии начал расследование.

Специалисты увидели в случившемся не злой умысел, но потрясающий природный феномен. Оказалось, что около 1,8 млрд лет назад на нескольких участках уранового месторождения в Окло (Габон), откуда поступила партия урана, происходили *цепные ядерные реакции деления*. Иными словами, там работал настоящий ядерный реактор, только не рукотворный, а природный! В частности, при изучении продуктов деления одного из таких реакторов было установлено, что он действовал в течение нескольких сотен тысяч лет в *импульсном режиме* – с рабочим циклом в полчаса и перерывом 2,5 часа, – выжигая уран-235.

Почему вообще так важна роль урана-235? Дело в том, что именно этот изотоп охотно делится под воздействием медленных нейтронов в отличие от преобладающего изотопа – урана-238, который может делиться только быстрыми нейтронами (а быстрые – в среде замедляются, и цепная реакция гаснет, не успев начаться).

Таким образом, за миллиарды лет до появления человека природа уже освоила технологию, над реализацией которой в середине XX в. бились лучшие умы планеты.

Сама идея атомного реактора в земных недрах возникла примерно в это же время – и почти за двадцать лет до открытия феномена Окло! В 1953 г. американские физики Дж. Везерилл и М. Ингрэм выдвинули смелую гипотезу, что в древнейшие времена в скоплениях радиоактивных элементов, главным образом урана и тория, могли протекать цепные ядерные реакции.

ИЗОТОПЫ УРАНА И ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ

Природный уран состоит, в основном, из смеси двух изотопов: ^{238}U и ^{235}U (99,3% и 0,7% соответственно). Период полураспада урана-238 – 4,5 млрд лет, урана-235 – около 700 млн лет. Из-за разной скорости естественного распада соотношение изотопов в природе изменяется со временем: доля более легкого урана-235 неуклонно уменьшается.

^{238}U и ^{235}U – родоначальники длинных радиоактивных рядов. Например, уран-238, распадаясь, сначала превращается в торий-234, который, в свою очередь, также распадается. Конечными (стабильными) нуклидами для естественных цепочек распада урана являются изотопы свинца. Суммарное количество энергии, выделяющейся во всей цепочке реакций, около 50 МэВ.

Суть цепной ядерной реакции деления заключается в том, что ядро радиоактивного элемента, например урана-235, захватывая нейтрон, становится неустойчивым и распадается преимущественно с образованием двух крупных осколков и – самое важное! – нескольких нейтронов. Эти нейтроны могут инициировать деление уже нескольких ядер – возникает цепная реакция.

Если потери нейтронов в такой разветвленной цепи реакций будут меньше, чем число вновь образовавшихся, то выделение энергии будет нарастать лавинообразно. В одном акте деления урана высвобождается энергии в 4 раза больше, чем при естественном распаде, причем скорость энерговыделения очень велика. Самые известные примеры процессов такого типа – реакции в атомной бомбе и реакторах АЭС.

Датируя эти предположительные процессы эпохой более 2 млрд лет назад, авторы исходили из соображения, что в середине геологической истории Земли доля изотопа ^{235}U в общем уране была существенно выше, чем сейчас, и составляла более 3% – как в топливе современных АЭС.

Поиски *геореакторов*, подобных оклоскому, предпринимались впоследствии и в других древних месторождениях, но они успехом не увенчались. Может быть, африканский реактор – это шутка Бога, результат случайного стечения обстоятельств и он действительно уникален? Даже если это так, идея, что в Земле могут идти – причем и в далеком прошлом, и в настоящее время! – ядерные реакции деления, не оставляет ученых.

Красноречивый гелий

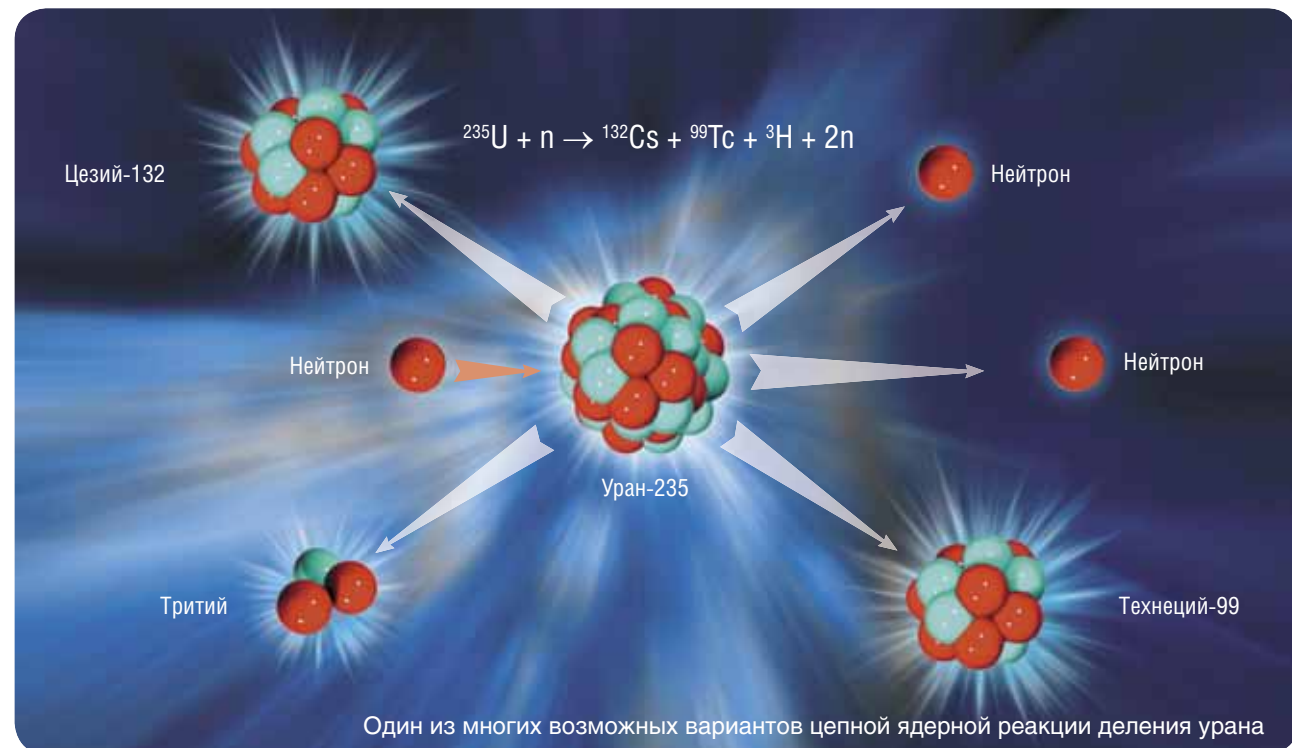
Признаки работы природных реакторов ищут не только в земной коре, но и в недрах планеты. Одна из причин упорства исследователей заключается в том, что Земля излучает тепла примерно в 2,5 раза больше, чем должна отдавать в результате естественного распада радиоактивных элементов в коре (*радиогенное тепло*) и первичного нагрева. (Тепловая энергия, получаемая от Солнца, в этом балансе не учитывается). Если такую большую разницу пытаться объяснить только радиогенным теплом из внутренних областей планеты, то Земля в целом должна иметь нереально большие запасы радиоактивных элементов.

Но вот в цепных ядерных реакциях как раз выделяется тепла в несколько раз больше, чем при естественном радиоактивном распаде. Цепной механизм выделения энергии мог бы объяснить и упомянутый тепловой дисбаланс, и многие другие необычные явления. И если гипотетические реакторы расположены глубоко в недрах, то понятно, почему следы их активности не удалось найти в урановых месторождениях (за исключением Окло). Искали где ближе, но, может, стоит «копнуть вглубь»?

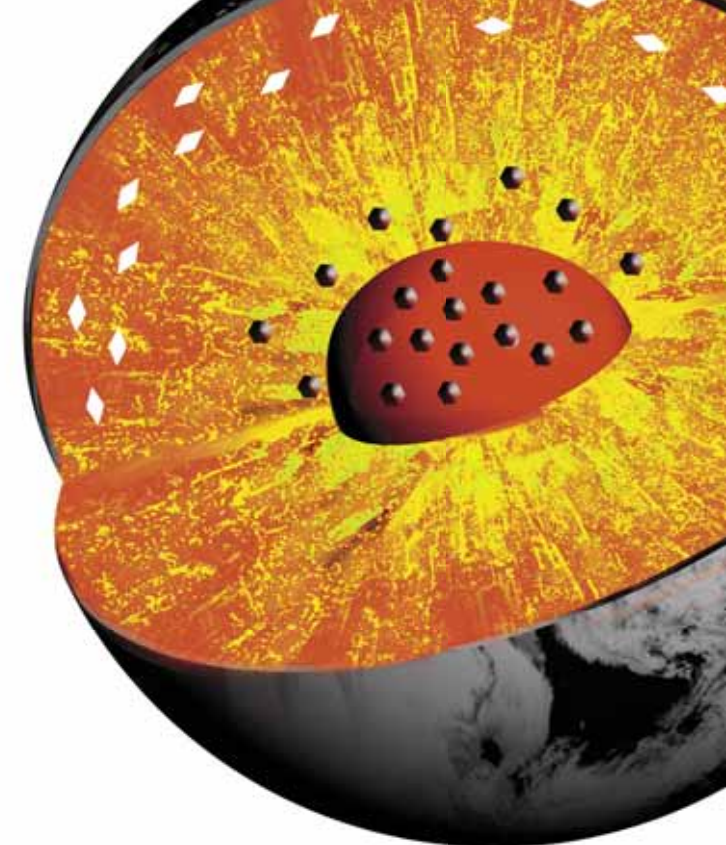
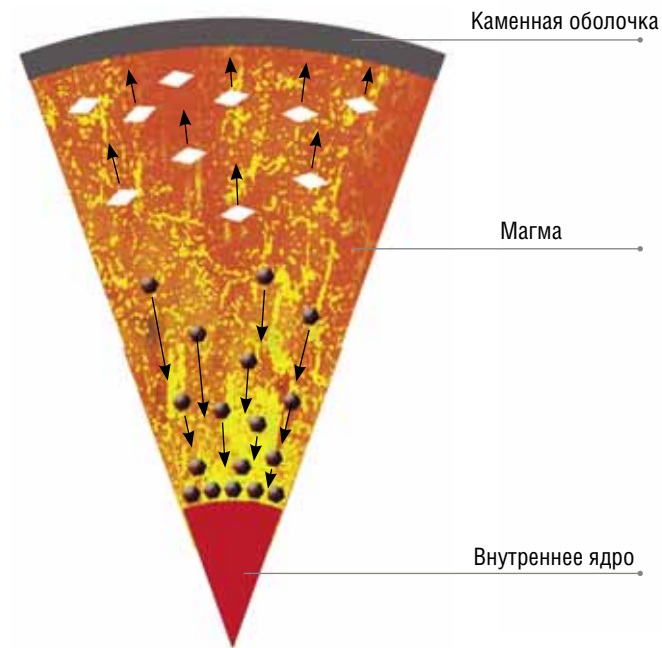
Итак, предположим, что где-то в теле Земли действует такой реактор. По каким признакам его можно обнаружить? Один из методов поиска – анализ продуктов деления, мигрирующих из зоны реакции и достигающих земной поверхности. В частности, очень интересен изотопный состав «солнечного элемента» – гелия.

Природный гелий состоит из двух стабильных изотопов: ^4He и ^3He . Некоторая часть гелия-3 поступает в атмосферу Земли с солнечным ветром и при β -распаде трития – тяжелого водорода, образующегося при соударении космических частиц с ядрами атомов, входящих в состав воздуха. Гелий-4 попадает в атмосферу в результате естественного распада урана и тория.

В воздухе на миллион атомов гелия-4 приходится всего полтора атома гелия-3. Но в базальтах срединно-океанических хребтов изотопа ^3He больше уже в 8 раз, а в некоторых изверженных магматических горных породах – в 40!



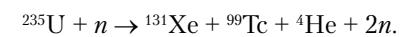
Гравитационное разделение вещества Земли более 4 млрд лет назад. Силикаты, преимущественно $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$, – как более легкие, всплывают; тяжелые оксиды урана UO_2 оседают на твердое внутреннее ядро



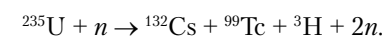
◇	●
Силикаты	Оксиды урана
$\rho \sim 3,5 \text{ г/см}^3$	$\rho \sim 11 \text{ г/см}^3$
$T_{\text{пл}} \sim 2000 \text{ К}$	$T_{\text{пл}} \sim 3100 \text{ К}$

Как объяснить происхождение гелия с высоким содержанием изотопа ^3He ? Какие физические процессы могут быть ответственны за это? Обычный радиоактивный распад явно не годится, так как он продуцирует исключительно гелий-4. Попробуем привлечь на помощь ядерные реакции деления.

Известно, что при работе реактора тяжелые ядра, поглощая нейтрон, становятся неустойчивыми и могут делиться на два крупных осколка с испусканием легких заряженных частиц и 2–3 нейтронов. Среди легких заряженных частиц доминируют ядра гелия-4 (α -частицы); их доля выхода около 90%. Эту реакцию можно записать, например, так:



В реакциях несколько другого типа образуется тритий (доля выхода до 10%):



Радиоактивный тритий, в свою очередь, распадается, испуская электрон (β -распад) и антинейтрино, с образованием гелия-3:

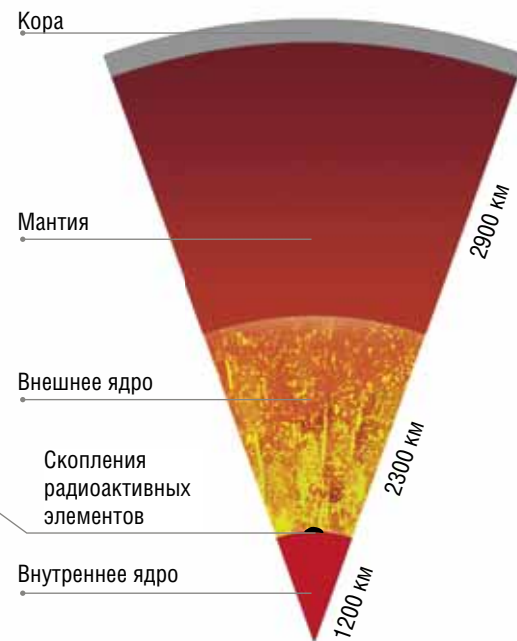
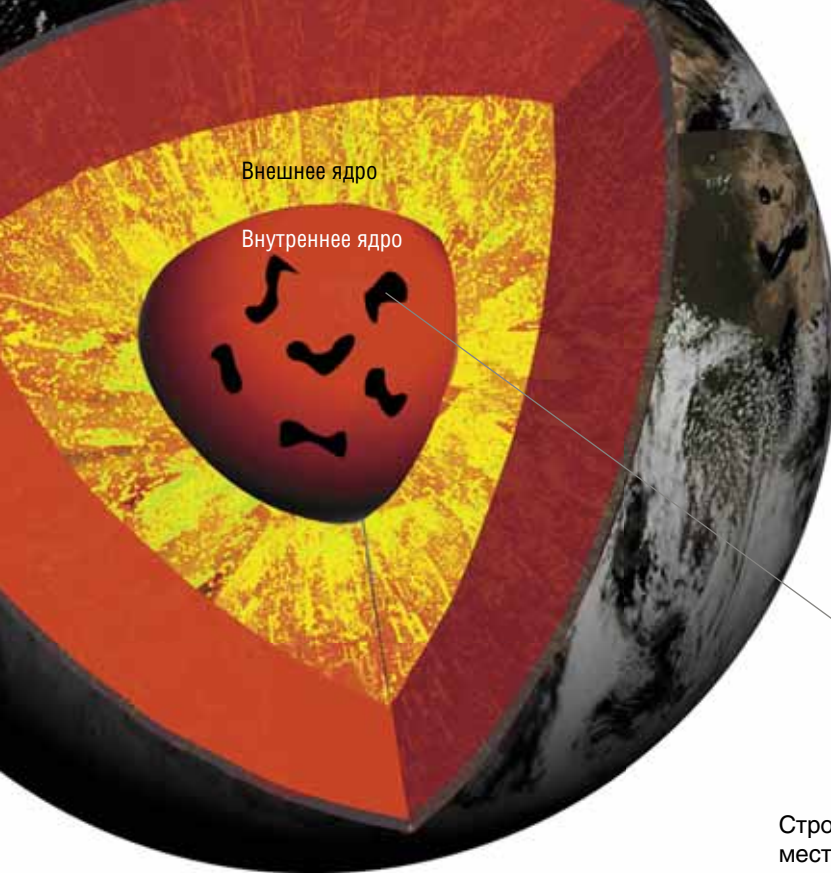


В конечном продукте совокупности таких реакций доли обоих изотопов гелия хотя и отличаются, но представляют собой величины одного порядка. Напомним, что в «стандартном» атмосферном гелии их концентрации различаются на шесть порядков! Таким образом, относительно высокое содержание гелия-3, наблюдаемое в магматических породах, поднявшихся на поверхность из земных недр, может служить косвенным свидетельством работы глубинного геореактора.

Уран выпал в осадок?

Прежде чем продолжить разговор, хочется еще раз подчеркнуть принципиальное различие между естественным радиоактивным распадом и ядерной реакцией деления, ибо разница эта не всегда очевидна на неисключенный взгляд. Обычная радиоактивность – это самопроизвольный распад атомных ядер; для реакции деления обязательно требуется взаимодействие с внешней частицей (нейтроном). По этой причине для осуществления ядерной реакции нужна достаточная концентрация активного вещества; для спонтанного распада концентрация не имеет никакого значения.

Если в недрах Земли действительно идут цепные реакции, значит, там должны присутствовать скопления радиоактивных элементов (*актиноидов*). Как и где



Строение Земли и предполагаемое месторасположение скоплений радиоактивных элементов – «островов» на поверхности внутреннего ядра

именно они образовались? На этот счет существует множество разных точек зрения: от мантии до геометрического центра Земли.

На рубеже XX–XXI вв. В.Ф. Анисичкин с соавторами предложили обоснованную гипотезу, согласно которой местом критической концентрации урана и тория могла быть поверхность твердого внутреннего ядра Земли. Эта

концепция во многом базируется на работах по растворимости диоксида урана (UO_2), проведенных в конце 1990-х гг. в Институте геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск). В экспериментах на аппарате высокого давления типа «разрезная сфера» А. И. Туркиным было показано, что растворимость UO_2 в расплавах на основе железа с ростом давления уменьшается. Исследуемый

диапазон давлений составлял 5–10 ГПа (для сравнения: в центре Земли давление около 360 ГПа). Поскольку в природе уран встречается преимущественно в виде оксидов, то логично сделать вывод: чем глубже, тем хуже будет растворяться уран!

Этот важный экспериментальный факт наводит на мысль, что миграция актиноидов в теле Земли могла быть следующей. После образования планеты в океане магмы, состоящей, в основном, из расплавов железа и силикатов, присутствовали и соединения урана. Со временем магма остывала, и происходило гравитационное разделение вещества по плотности. Силикаты, кристаллизуясь, всплывали в магме, плотность которой за счет железа была выше. Соединения же тяжелых актиноидов, выделяясь из расплава по мере роста давления и кристаллизуясь, оседали на внутреннее твердое железоникелевое ядро планеты.

Из сейсмологических исследований известно, что переходная зона между внешним жидким и внутренним твердым ядром Земли толщиной 2–3 км имеет мозаичную структуру. При этом основными структурными элементами являются относительно тонкие взвешенные слои протяженностью до нескольких десятков километров. Возможно, именно они и являются областями концентрации тяжелых радиоактивных элементов.

Не можешь найти – моделируй!

Когда речь идет о процессах на глубинах в тысячи километров, следует иметь в виду, что, с одной стороны,

они недоступны непосредственному экспериментальному исследованию, с другой – их не всегда возможно изучать и в лабораторных установках, где трудно создать аналогичные физические условия. Но в современной науке существует еще один универсальный инструмент познания – компьютерное моделирование.

В 2005 г. ученые из Института гидродинамики СО РАН (Новосибирск) и Физико-энергетического института (Обнинск) численно смоделировали различные режимы работы геореакторов, начиная со времени образования Земли. Задача была не из легких, поскольку методы теории реакторов традиционно применяются для расчета процессов длительностью максимум в годы, а здесь потребовалось просчитывать интервалы в миллиарды лет!

Моделируемая среда представляла собой железоникелевый расплав с примесью углерода, в котором находились взвешенные кристаллы диоксида урана. Время начала моделируемых процессов – 4 млрд лет назад (содержание делящегося изотопа ^{235}U в природном уране тогда составляло 16%, т. е. в 20 раз превышало современное значение).

Расчеты показали, что теоретически существуют разные сценарии работы реактора. По некоторым из них его активность могла давно прекратиться, по другим – продолжаться до настоящего времени. Максимальная продолжительность возможна в режиме воспроизводства делящихся нуклидов. При этом уран-238, захватывая нейтрон деления, превращается в плутоний, а плутоний, испуская α -частицу, – в уран-235:

КОММЕНТАРИЙ ГЕОЛОГА

В статье популярно изложена гипотеза, предложенная авторами для объяснения энергетической активности Земли. Согласно их идее при кристаллизации магматического океана происходило «гравитационное разделение вещества по плотности», в результате которого силикаты, кристаллизуясь, всплывали, а соединения тяжелых актиноидов оседали на внутреннее ядро планеты. В дальнейшем сконцентрировавшаяся таким образом масса актиноидов, и в первую очередь соединения урана, играла роль ядерного реактора, генерирующего энергию, обусловленную цепными реакциями деления.

К сожалению, в самой основе этой занимательной гипотезы лежит недоразумение. Кристаллизация каких-либо соединений актиноидов в виде самостоятельных минеральных фаз, которые могли бы погружаться в недра планеты, в магматическом океане невозможна. Прежде всего, это обусловлено исключительно низкими концентрациями урана и других актиноидов в протопланетном веществе. При кристаллизации

расплава, который возникает на основе такого вещества, весь уран распределяется в кристаллической решетке породообразующих минералов или на их границах в виде примеси, как и многие другие редкие и рассеянные элементы.

Конечно, образование скоплений редких элементов в природе возможно (вспомним, например, самородное золото), только это происходит в коре и не в результате кристаллизации магматических расплавов, а за счет разгрузки гидротермальных растворов, транспортирующих эти элементы и сбрасывающих их при изменении физических условий.

В ходе геологических процессов зарождающиеся в недрах планеты магматические расплавы вследствие более низкой плотности по сравнению с твердым веществом перемещаются к поверхности. В тех случаях, когда они прорываются на поверхность, возникает вулкан. Когда такой расплав застревает на глубине и кристаллизуется в магматической камере, образуется твердое магматическое тело, называемое *интрузивом*.

Дифференциация вещества по плотности при формировании магматических тел принципиально ничем не отличается от такой дифференциации при затвердевании расплава в магматическом океане. Однако кристаллизующиеся силикаты магния и железа в этих расплавах вопреки предположению авторов обсуждаемой гипотезы не всплывают, а тонут, потому что их плотность всегда выше плотности жидкой фазы. Утверждая, что плотность магмы увеличится за счет железа, авторы упускают из виду, что в магматическом океане металл сразу образует самостоятельную жидкую фазу, не смешивающуюся с силикатной, которая опустится на дно задолго до начала кристаллизации силикатов.

Возвращаясь к интрузивам, заметим, что никаких скоплений минералов, сложных актиноидами, на дне соответствующих магматических камер нет, несмотря на то, что концентрация урана как в самих интрузивных телах, так и в исходных расплавах зачастую на два порядка превосходит его концентрацию

в протопланетном веществе и магматическом океане. Все происходит ровно наоборот: основная часть урана концентрируется в остаточной жидкости, которая, как правило, собирается в верхней части магматической камеры, после того как основной объем расплава уже затвердел. Поэтому, даже если бы в этих последних порциях расплава и возникли какие-то тяжелые урансодержащие минералы, опускаться им было бы некуда.

Конечно, для объективной оценки обсуждаемой гипотезы необходимы исследования специалистов в различных областях науки. Что касается геологической составляющей, то я считаю, что предложенная концепция пока не подтверждается фактическим материалом.

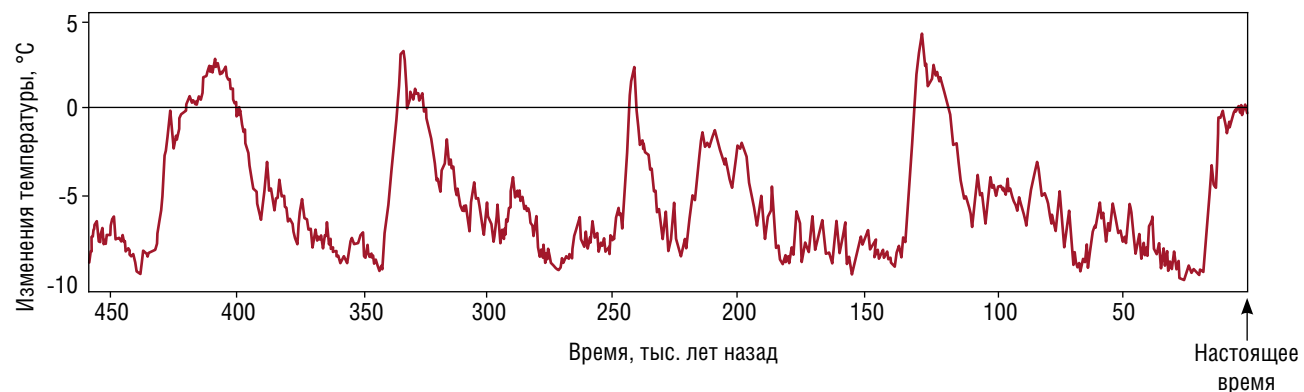
Ю.Д. Пушкарев, д.г.-м.н., главный научный сотрудник Института геологии и геохронологии докембрия РАН (Санкт-Петербург)

Ряд глобальных явлений на Земле носит циклический характер с периодом в сотни тысяч и миллионы лет. О причинах этих колебаний нет единого мнения.

ТО ХОЛОДНО, ТО ЖАРКО

Отполированные скалы, огромные валуны посреди равнин... Еще в XIX в. эти явления были объяснены воздействием ледников, покрывавших некогда поверхность нашей планеты. По обломочным окаменевшим моренам и ледниково-морским осадкам, обнаруженным на всех континентах, ученые восстановили ледниковую историю Земли за последние 2,5 млрд лет.

В течение этого времени Земля пережила четыре ледниковые эры, каждая эра состояла из ледниковых периодов, а период – из ледниковых эпох. Периодичность потеплений-похолоданий, соответствующая смене ледниковых эпох, составляет около 100 тыс. лет. Подробнейшая информация о палеоклимате получена при бурении ледниковых щитов в Антарктиде. Регулярность потеплений (~ 10 тыс. лет) и похолоданий (~ 90 тыс. лет), надежно установленная в этих исследованиях, может свидетельствовать в пользу импульсного режима работы геореакторов, тепловые потоки от которых достигают поверхности Земли.



Температурные изменения в Антарктиде за последние 450 тыс. лет (относительно современного значения). Результаты получены на основе анализа содержания различных примесей (прежде всего, дейтерия и изотопа кислорода ¹⁸O) в осадках, выпадающих в виде снега и сохранившихся на глубинах до нескольких километров. По: (Jouzel, Masson-Delmotte et al., 2007)



В результате содержание легко делящегося урана-235 поддерживается на достаточно высоком уровне, и получается реактор-размножитель на быстрых нейтронах.

Вполне естественно предположить, что при работе реактора из-за тепловыделения возникают конвективные потоки, вызывающие разрыхление активной зоны. В какой-то момент цепная реакция деления останавливается. Когда выделение тепла прекращается и конвективные потоки ослабевают, уран медленно оседает – цепная реакция возобновляется. Таким образом, геореактор может работать и в импульсном режиме.

Определяющим показателем хода цепной реакции является коэффициент размножения нейтронов *k*, который равен отношению числа нейтронов, вновь образовавшихся в реакциях деления, к количеству нейтронов, поглощенных в ходе реакции либо покинувших активную зону.

Чтобы цепная реакция была возможна, должно выполняться неравенство $k \geq 1$. Тогда в каждом новом

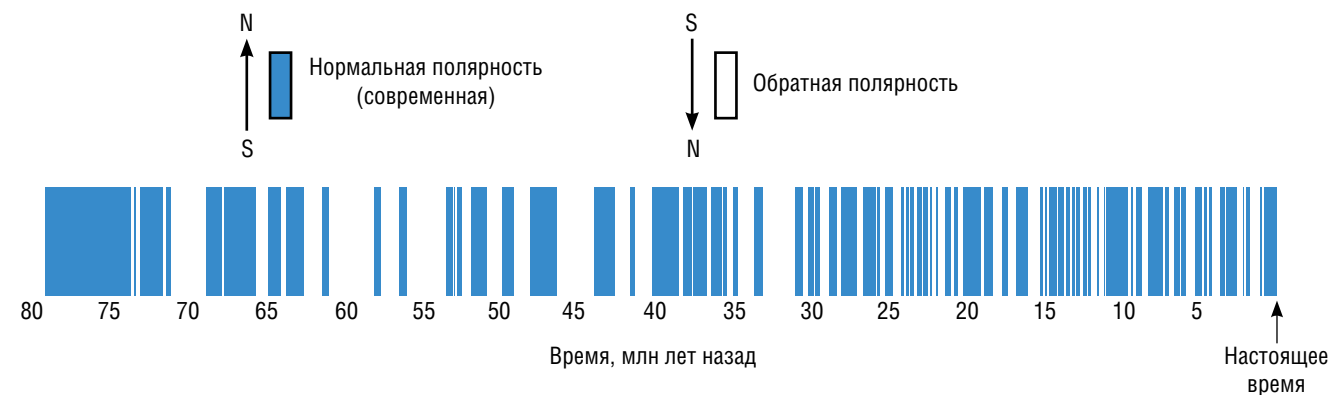
поколении нейтронов становится все больше, и они, в свою очередь, вызывают все больше делений ядер. Возникает лавинообразный процесс. Согласно проведенным расчетам максимально возможный коэффициент размножения ведет себя следующим образом: вначале он падает в течение 1 млрд лет, однако затем более-менее стабилизируется и остается больше единицы вплоть до настоящего времени.

Представляется, что более вероятен импульсный сценарий работы реактора, когда периоды активности перемежаются периодами «простоя». Так, как это было в маленьком природном реакторе Окло, но только с большей продолжительностью циклов. По мнению авторов, временные характеристики рассчитанного импульсного режима можно соотнести с рядом периодических явлений, наблюдаемых на поверхности Земли, таких как глобальные изменения климата или смена магнитных полюсов.

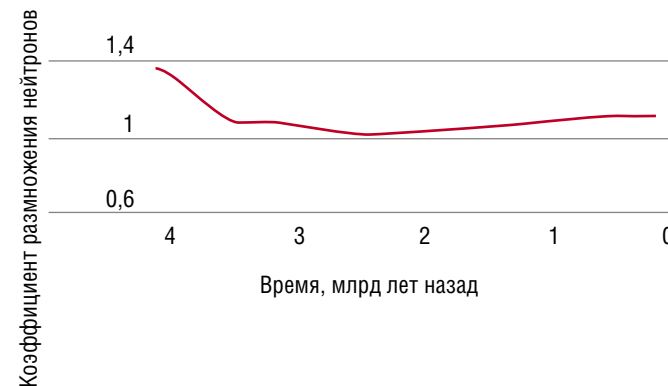
МАГНИТНЫЙ ШТРИХКОД ПЛАНЕТЫ

В 1906 г. было обнаружено, что намагниченность неогеновых лав в центральной Франции противоположна направлению современного магнитного поля Земли. Каково значение этого факта? Дело в том, что изверженные породы, застывая, намагничиваются в соответствии с существующим на тот момент направлением магнитного поля. Таким образом, эта «законсервированная» в породе намагниченность наглядно продемонстрировала, что в прошлом поле было другим. Замеры следов магнитного поля в горных породах различного возраста показали, что на протяжении геологической истории Земли оно меняло знак много-

много раз. Инверсии происходили через интервалы времени от десятков тысяч до миллионов лет (средний период – 250 тыс. лет). Почему происходит смена магнитных полюсов? Магнитное поле планеты формируется благодаря циркуляции расплавленного железа во внешнем ядре. Движение электропроводящей жидкости в магнитном поле создает самоподдерживающуюся систему, своего рода геодинамо. Но для образования мощных переменных течений в ядре, приводящих к изменению магнитного поля, необходимы и мощные нестационарные источники тепла. Вполне подходящими кандидатами на эту роль опять-таки являются природные ядерные реакторы.



Магнитостратиграфическая шкала показывает инверсии магнитного поля Земли за последние 80 млн лет. По: (Cande, Kent, 1995)



Результаты расчета коэффициента размножения нейтронов в гипотетическом геореакторе. Моделируемая среда – железоникелевый расплав с примесью углерода и взвешенных кристаллов диоксида урана. Температура – 5000 К, давление – 330 ГПа, удельная мощность реактора – $0,385 \cdot 10^{-5}$ Вт/см³

Откуда летят геонейтрино?

Сторонники точки зрения, что Земля является ядерным реактором, сегодня связывают особые надежды с электронным антинейтрино. Эта частица в больших количествах образуется в цепных реакциях, при последовательных β-распадах осколков деления тяжелых ядер.

Нейтрино практически не реагируют с веществом и поэтому обладают огромной проникающей способностью, почти без потерь проходя через все тело Земли. Их регистрация – сложная научная и техническая задача.

В 2005 г. группа исследователей, работавшая на нейтринном детекторе KamLAND (Япония), сообщила о первых результатах регистрации антинейтрино из недр Земли – геонейтрино. В течение двух лет ученые зафиксировали 152 события, но после отсеивания фона осталось всего 25 – по одному в месяц. (Главными источниками фона оказались промышленные реакторы Японии и Южной Кореи).

Полное число антинейтрино может быть частично связано с мощностью действующего геореактора и частично – с естественным распадом различных нестабильных ядер в недрах Земли. Из данных KamLAND следует, что полная плотность потока геонейтрино составляет примерно 16 млн частиц в секунду на кв. см. Это соответствует источнику тепла, порождаемого ядерными реакциями, мощностью от 24 до 60 ТВт. Первое из двух чисел оказалось близким к величине «избыточного» тепла, излучаемого Землей, о котором шла речь выше. И многие специалисты склоняются к мнению, что это объяснение наиболее правдоподобно.

Энергетические спектры нейтрино, образующихся при делении разных ядер, отличаются. При интерпретации данных KamLAND в 2007 г. В.Д. Русов с коллегами выполнили компьютерное моделирование и определили спектральные составляющие геонейтрино от различных внутренних источников – урана-238, тория-232, плутония-239. Суммарную мощность геореактора они оценили в 30 ТВт. Результаты этой работы также свидетельствуют в пользу импульсного режима размножения.

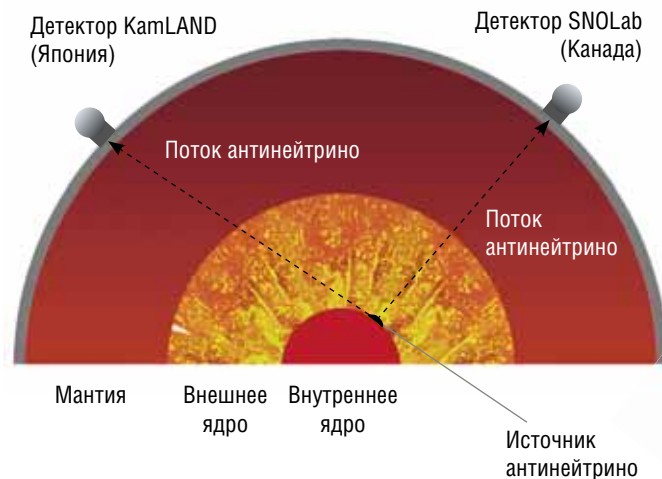
У замечательных экспериментов на KamLAND есть один существенный недостаток: в них нельзя определить расстояние до источника частиц, только направление. Для решения этой и других задач предполагается создать глобальную сеть детекторов. Подобный опыт у международного научного сообщества уже есть: в 2005 г. был запущен проект интеграции четырех нейтринных детекторов на четырех континентах – в Японии, Канаде, Италии и Антарктиде – для прогнозов вспышек сверхновых в Галактике.

Таким образом, в ближайшее десятилетие планируется зарегистрировать геонейтрино в нескольких точках земного шара. Объединение данных разных детекторов позволит наконец установить точное месторасположение источников этих частиц внутри нашей планеты и даст еще один довод «за» или «против» гипотезы «ядерной топки» Земли.

Вместо послесловия

Известно, что на атомной электростанции может произойти взрыв, если не регулировать ход цепной реакции в реакторе. Есть веские основания полагать, что в далеком прошлом по разным причинам – внутренним или внешним, например при столкновении с астероидом, – медленные ядерные реакции в недрах Земли могли трансформироваться во взрывные.

Если бы взорвался весь уран Земли, событие было бы эквивалентно взрыву тротила в количестве, сравнимом с массой планеты! И Земля перестала бы существовать. Однако даже теоретически трудно представить меха-



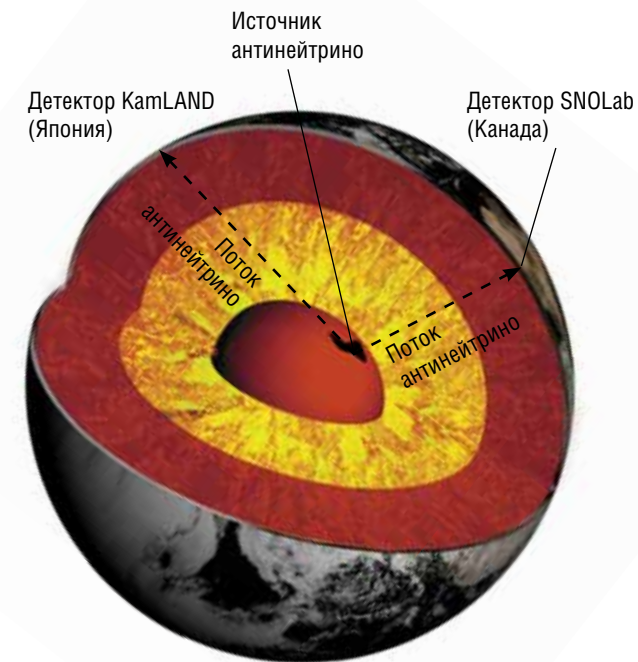
Будущая сеть нейтринных детекторов позволит установить точное месторасположение внутри Земли источников антинейтрино (геореакторов). Из рисунка видно, что источник должен находиться на пересечении траекторий, по которым частицы приходят, по крайней мере, на два детектора

1 ТВт = 1000 ГВт = 10¹² Вт
Мощность геореактора = 30 000 ГВт
Мощность Саяно-Шушенской ГЭС = 6,4 ГВт

низм, по которому бы земной уран мог сконцентрироваться и одновременно прореагировать. Но взрыва даже нескольких процентов актиноидов вполне достаточно, чтобы отделить от Земли фрагмент размером с Луну.

Этот «апокалиптический» пассаж касается не только нашей планеты, но и других. Ведь большие тела Солнечной системы образовались из одного протопланетного облака, поэтому и содержание радиоактивных элементов в них может быть схожим. Все планеты, вероятно, прошли стадию гравитационного разделения вещества по плотности, в результате которого тяжелые актиноиды могли сконцентрироваться в их недрах.

Катастрофические ядерные события хорошо объясняют ряд так называемых нерегулярностей в Солнечной системе, казалось бы, ничем между собой не связанных. Среди них аномально большая масса спутника Земли – Луны, малая масса Марса, обратное суточное вращение Венеры, множество хаотично движущихся астероидов и комет... Не исключено, что исследования нашего «домашнего» земного реактора заставят нас по-новому взглянуть и на вопросы эволюции планет.



Литература
 Анисичкин В.Ф. // *Физика горения и взрыва*. – 1997. – Т. 33. – С. 138.
 Анисичкин В.Ф., Бордзиловский С.А., Караханов С.М. и др. // *Физика горения и взрыва*. – 2009. – Т. 45. – С. 100.
 Митрофанов В.В., Анисичкин В.Ф., Воронин Д.В. и др. // *V Забабахинские научные чтения*. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ ВНИИТФ, 1999. (Тр. междунар. конф.)
 Овчинников В.М., Краснощеков Д.Н., Каазик П.Б. // *Докл. РАН*. – 2007. – Т. 417. – С. 389.
 Anisichkin V.F., Bezborodov A.A., Suslov I.R. // *Transport Theory and Statistical Physics*. – 2008. – V. 37. – P. 624.
 Araki T. et al. // *Nature*. – 2005. – V. 436. – P. 499.
 Rusov V.D., Pavlovich V.N., Vaschenko V.N. et al. // *Journ. Geophys. Res.* – 2007. – V. 112. – P. 1.

Авторы признательны академику В.М. Титову за поддержку проводимых в СО РАН исследований по цепным ядерным реакциям в недрах планет

КОММЕНТАРИЙ СПЕЦИАЛИСТА ПО ГЕОДИНАМИКЕ

Сегодня вопрос о природе источника тепла в недрах Земли и его расположении является дискуссионным. Этой темой активно занимаются и геологи, и химики, и физики, и математики.

Так, в Институте геологии и минералогии СО РАН разработана модель термохимического плюма – канала, заполненного магматическим расплавом, который простирается из земных недр до поверхности (Н.Л. Добрецов, А.А. Кирдяшкин, А.Г. Кирдяшкин, 2001, 2004). Данные по удельным расходам излияния магм мантийных плюмов за последние 150 млн лет, а также их корреляция с инверсиями магнитного поля Земли (Larson, Olson, 1991) подтверждают наш тезис, что плюмы зарождаются на ядро-мантийной границе.

Плюм формируется при обязательном наличии теплового потока из жидкого ядра. Изучение тепло- и массообмена на подошве термохимического плюма и взаимодействия канала плюма со свободными конвективными течениями в мантии приводит к заключению, что источник тепла действительно расположен в ядре, как и предполагают авторы гипотезы глубинного геореактора.

Что касается изотопного состава гелия, то повышенное содержание гелия-3, обнаруженное в плюмах, указывает на то, что в ядре Земли идут какие-то процессы, связанные с ядерными превращениями. Но, к сожалению, мы очень мало знаем о том, что происходило в начальный момент формирования планеты, и существовал ли, как считают авторы, «океан магмы». Поэтому вопрос о скоплениях актиноидов в ядре еще предстоит разрешить.

Причиной же климатических изменений, о которых упоминают авторы статьи, на мой взгляд, не могут быть колебания температуры в ядре Земли. Ведь глубинные температурные флуктуации передаются на поверхность мантийными конвективными течениями примерно через 100 млн лет, а плюмы могут донести эти изменения за 1–5 млн лет. За это время флуктуации с периодом всего 100 тыс. лет просто исчезнут в восходящем конвективном потоке из-за теплообмена с окружающей мантией.

В любом случае модель природного ядерного реактора на границе внутреннего и внешнего ядра интересна геологам уже тем, что не противоречит имеющимся знаниям в области геодинамики и фактам плюмового магматизма. Безусловно, предложенная гипотеза подлежит дальнейшей разработке, и достоверность ее должны подтвердить новые геологические, геофизические и геохимические данные о планете Земля.

А.Г. Кирдяшкин, д.т.н., главный научный сотрудник Института геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск)

Э. КРАУЗЕ, А. М. ХАРИТОНОВ



Аэрокосмический транспорт БУДУЩЕГО

Мощным толчком ракета вертикально поднимается со стартовой площадки и уходит ввысь... Эта привычная с 1960-х гг. картина в скором времени может кануть в Лету. На смену одноразовым космическим системам и «челнокам» должно прийти новое поколение аппаратов – воздушно-космические самолеты, которые будут обладать способностью взлетать и приземляться горизонтально, подобно обычным авиалайнерам



КРАУЗЕ Эгон – заслуженный профессор, с 1973 по 1998 гг. – директор Аэродинамического института Рейн-Вестфальской технической высшей школы (RWTH) (Ахен, Германия). Лауреат премии Общества Макса Планка, почетный доктор Сибирского отделения РАН



ХАРИТОНОВ Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск). Заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Совета Министров СССР (1985). Автор и соавтор около 150 научных работ и 2 патентов

Дальнейшее развитие космонавтики определяется необходимостью интенсивной эксплуатации космических станций, развития систем глобальной связи и навигации, мониторинга окружающей среды в планетарном масштабе. Для этих целей в ведущих странах мира ведутся разработки *воздушно-космических самолетов* (ВКС) многократного использования, которые позволят существенно снизить стоимость доставки грузов и людей на орбиту. Это будут системы, характеризующиеся возможностями, наиболее актуальные из которых следующие:

- многоразовое использование для вывода на орбиту производственных и научно-технических грузов с относительно небольшим промежутком времени между повторными вылетами;
- возвращение аварийных и отработавших конструкций, засоряющих космос;
- спасение экипажей орбитальных станций и космических кораблей в аварийных ситуациях;
- срочная разведка районов стихийных бедствий и катастроф в любой точке земного шара.

В странах с развитыми авиационно-космическими

технологиями достигнуты большие успехи в области высоких скоростей полета, которые определяют потенциальную возможность создания широкого спектра гиперзвуковых воздушно-реактивных самолетов. Есть все основания полагать, что в будущем пилотируемая авиация освоит скорости от чисел Маха $M = 4-6$ до $M = 12-15$ (пока держится рекорд $M = 6,7$, установленный еще в 1967 г. американским экспериментальным самолетом X-15 с ракетным двигателем).

Если говорить о гражданской авиации, то освоение больших скоростей чрезвычайно важно для интенсификации пассажирских перевозок и деловых связей. Гиперзвуковые пассажирские самолеты с числом Маха 6 смогут обеспечить малоутомительную продолжительность перелета (не более 4 часов) на международных маршрутах с дальностью около 10 тыс. км, таких как Европа (Париж) – Южная Америка (Сан-Паулу), Европа (Лондон) – Индия, США (Нью-Йорк) – Япония. Вспомним, что время полета сверхзвукового «Конкорда» от Нью-Йорка до Парижа составляло около 3 часов, а «Боинг-747» затрачивает на этом маршруте около 6,5 часа. Самолеты будущего с числом Маха 10



СЛОВАРЬ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ

Число Маха – параметр, характеризующий, во сколько раз скорость летательного аппарата (или газового потока) больше скорости звука

Гиперзвуковая скорость – нестрогий термин для обозначения скорости с числом Маха, превышающим 4 ÷ 5

Число Рейнольдса – параметр, характеризующий соотношение между силами инерции и силами вязкости в потоке

Угол атаки – наклон плоскости крыла к линии полета

Скачок уплотнения (ударная волна) – узкая область течения, в которой происходит резкое падение скорости сверхзвукового газового потока, приводящее к скачкообразному увеличению плотности

Волна разрежения – область течения, в которой происходит резкое уменьшение плотности газовой среды

Схема модели двухступенчатой аэрокосмической системы ELAC–EOS. Эти аппараты будут взлетать и садиться горизонтально, подобно обычным самолетам. Предполагается, что длина полномасштабной конфигурации составит 75 м, а размах крыла – 38 м. *По: (Рейбл, Якобс, 2005)*

за 4 часа смогут преодолеть 16–17 тыс. км, совершив беспосадочный перелет, например, из США или Европы в Австралию.

Новые подходы

Для гиперзвуковых самолетов необходимы новые технологии, совершенно отличные от тех, которые присущи современным самолетам и вертикально взлетающим космическим аппаратам. Конечно, ракетный

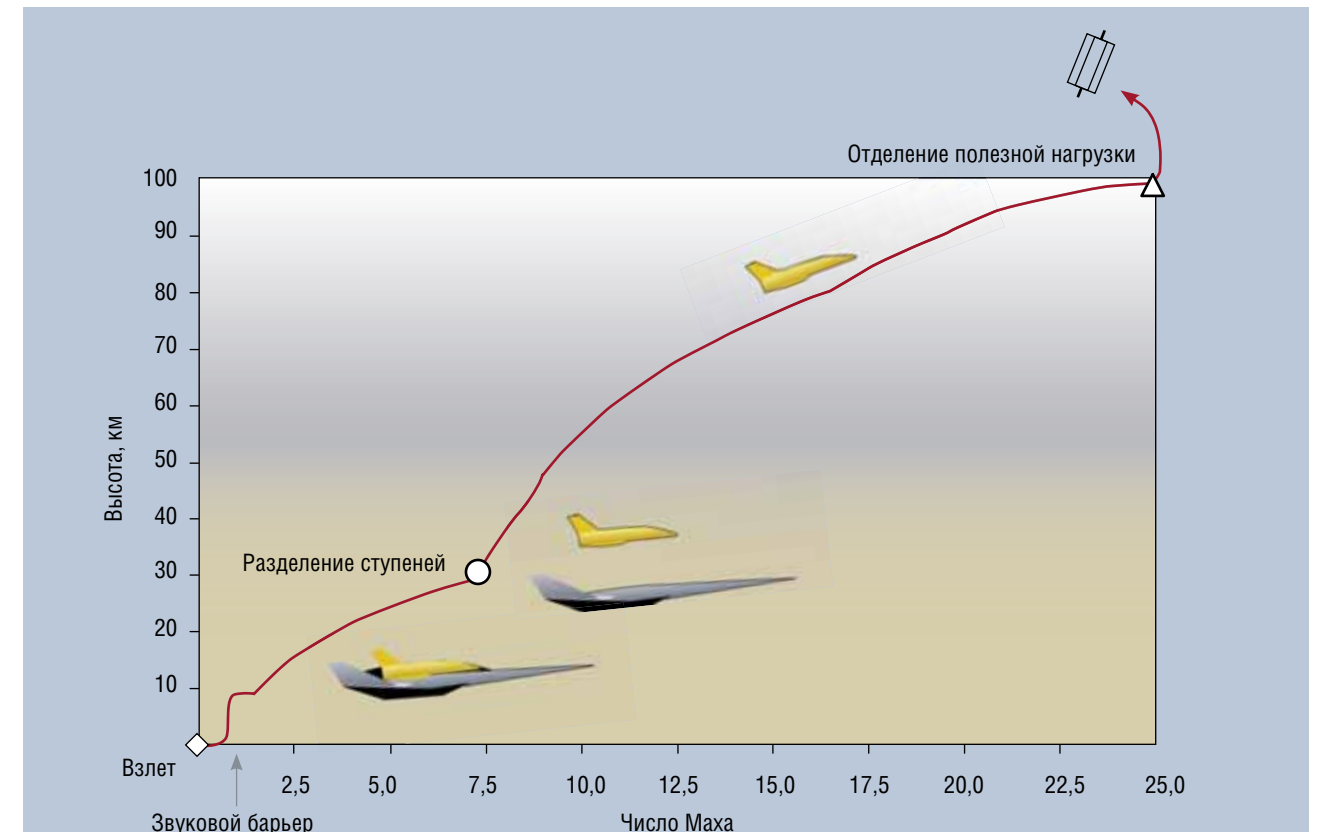
двигатель производит большую тягу, но он расходует горючее в огромных количествах, и к тому же ракета должна нести окислитель на борту. Поэтому использование ракет в атмосфере ограничивается кратковременными полетами.

Стремление решить эти сложные технические задачи привело к разработке различных концепций космических транспортных систем. Принципиальным направлением, которое активно исследуется ведущими аэрокосмическими фирмами мира, является одноступенчатый ВКС. Такой воздушно-космический самолет, взлетая с обычного аэродрома, может обеспечить доставку на околоземную орбиту полезной нагрузки, составляющей около 3% от взлетного веса. Другая концепция многоразовых систем – двухступенчатые аппараты. В этом случае первая ступень оснащается воздушно-реактивным двигателем, а вторая – является орбитальной, и разделение ступеней осуществляется в диапазоне чисел Маха от 6 до 12 на высотах около 30 км.

В 1980–1990 гг. проекты ВКС разрабатывались в США (NASP), Англии (HOTOL), ФРГ (Sänger), Франции (STS-2000, STAR-H), России (ВКС НИИ-1, «Спираль», Ту-2000). В 1989 г. по инициативе Немецкого исследовательского общества (DFG) начались совместные исследования трех германских центров:

Рейн-Вестфальской технической высшей школы в Ахене, Технического университета Мюнхена и Университета Штутгарта. Эти центры, спонсируемые DFG, провели долгосрочную программу исследований, включающую изучение фундаментальных вопросов, необходимых для проектирования космических транспортных систем, таких как общая разработка, аэродинамика, термодинамика, механика полета, двигатель, материалы и пр. Значительная часть работ по экспериментальной аэродинамике была выполнена в сотрудничестве с Институтом теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН. Организация и координация всех исследовательских работ осуществлялись комитетом, который в течение десяти лет возглавлял один из авторов настоящей статьи (Э. Краузе). Мы предлагаем вниманию читателя ряд наиболее наглядных визуальных материалов, иллюстрирующих некоторые результаты, полученные в рамках этого проекта в области аэродинамики.

Полет двухступенчатой системы ELAC–EOS должен охватывать широчайший диапазон скоростей: от преодоления звукового барьера (M = 1) до отделения орбитальной ступени (M = 7) и выхода ее на околоземную орбиту (M = 25). *По: (Рейбл, Якобс, 2005)*





Большая модель ELAC 1 (длиной более 6 м) в рабочей части германско-голландской аэродинамической трубы DNW малых скоростей.
По: (Рейбл, Якобс, 2005)

Двухступенчатая система ELAC–EOS

Для исследований была предложена концепция двухступенчатого аэрокосмического аппарата (несущая ступень называлась по-немецки ELAC, орбитальная – EOS). Топливо – жидкий водород. Предполагалось, что полномасштабная конфигурация ELAC будет иметь длину 75 м, размах крыла – 38 м и большой угол стреловидности. При этом длина ступени EOS составляет 34 м, а размах крыла – 18 м. Орбитальная ступень имеет эллиптическую носовую часть, центральный корпус с полуцилиндрической верхней стороной и один киль в плоскости симметрии. На верхней поверхности первой ступени имеется углубление, в котором размещена орбитальная ступень при наборе высоты. Хотя оно неглубокое, при гиперзвуковых скоростях во время разделения ($M = 7$) оказывает существенное влияние на характеристики потока.

Для проведения теоретических и экспериментальных исследований были спроектированы и изготовлены несколько моделей несущей и орбитальной ступеней в масштабе 1:150. Для испытаний при малых скоростях в германско-голландской аэродинамической трубе DNW была сделана большая модель исследуемой конфигурации в масштабе 1:12 (длина более 6 м, масса около 1600 кг).

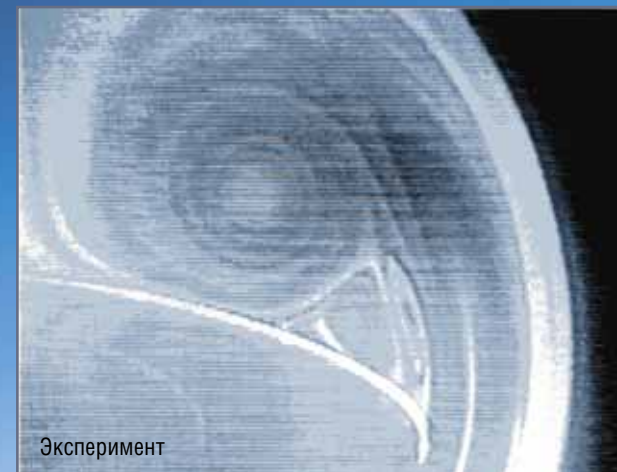
Визуализация сверхзвука

Полет со сверхзвуковой скоростью представляет для исследователя большую сложность, поскольку сопровождается формированием ударных волн, или скачков уплотнения, а летательный аппарат в таком полете проходит несколько режимов обтекания (с различными локальными структурами), сопровождающихся ростом тепловых потоков.

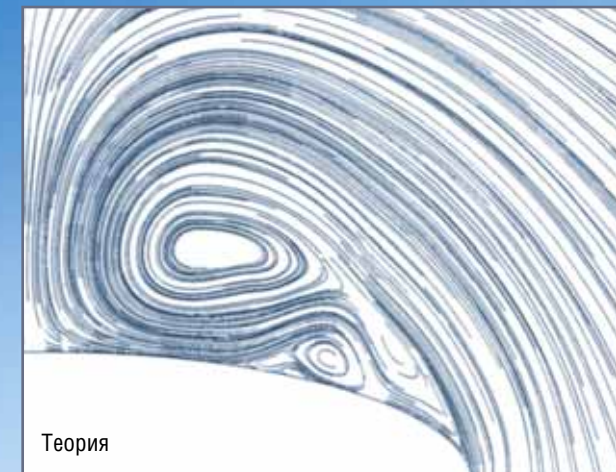
Эта задача в проекте ELAC–EOS исследовалась и экспериментально, и численно. Большинство экспериментов было проведено в аэродинами-



Маслосажеваемая картина линий тока на поверхности модели ELAC 1, полученная в аэродинамической трубе Т-313 Института теоретической и прикладной механики СО РАН.
По: (Krause et al., 1999)



Эксперимент



Теория

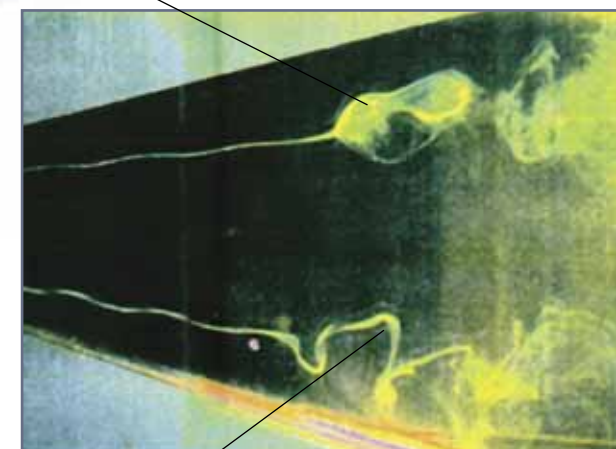
Сравнение результатов численного моделирования вихревых структур на подветренной стороне модели ELAC 1 (справа) и экспериментальной визуализации методом лазерного ножа (слева). Результаты численного расчета получены решением уравнений Навье–Стокса для ламинарного течения при числе Маха $M = 2$, числе Рейнольдса $Re = 4 \cdot 10^6$ и угле атаки $\alpha = 24^\circ$. Расчетные вихревые картины похожи на наблюдаемые экспериментально; имеются различия в поперечных формах отдельных вихрей. Заметим, что набегающий поток перпендикулярен плоскости картинки. По: (Stromberg et al., 1996)

ческой трубе Т-313 ИТПМ СО РАН в Новосибирске. Число Маха набегающего потока в этих экспериментах изменялось в диапазоне $2 < M < 4$, число Рейнольдса – $25 \cdot 10^6 < Re < 56 \cdot 10^6$, а угол атаки – в диапазоне $3^\circ < \alpha < 10^\circ$. При этих параметрах измерялось распределение давлений, аэродинамические силы и моменты, а также выполнялась визуализация линий тока на поверхности модели.

Полученные результаты в числе прочего ясно демонстрируют образование вихрей на подветренной стороне. Панорамные картины течений на поверхности модели визуализировались посредством покрытия специальными жидкостями или маслосажеваемой смесью. В типичном примере маслосажеваемой визуализации видно, как поверхностные линии тока сворачиваются внутрь от передней кромки крыла и стекаются в линию, ориентированную приблизительно в направлении течения. Наблюдаются также другие полосы, направленные в сторону центральной линии модели.

Эти четкие следы на подветренной стороне характеризуют поперечное течение, трехмерную структуру которого можно наблюдать с помощью метода лазерного ножа. С увеличением угла атаки поток воздуха перетекает с наветренной поверхности крыла на подветренную, формируя сложную вихревую систему. Отметим, что первичные вихри с пониженным давлением в ядре вносят положительный вклад в подъемную силу аппарата. Сам метод лазерного ножа основан на фотографировании когерентного излучения, рассеянного

Вихревой пузырь в переходном состоянии



Полностью развившаяся вихревая спираль

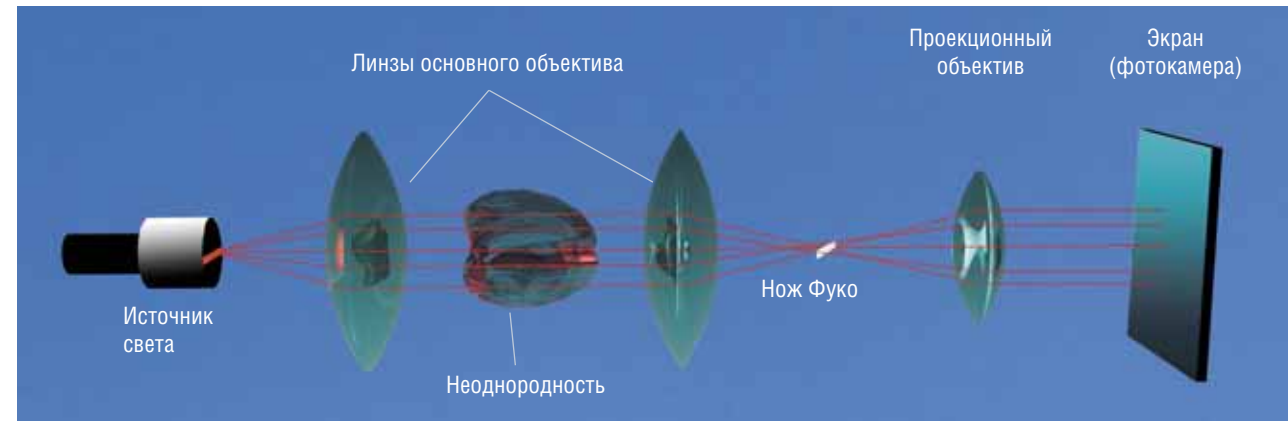
Процессы распада вихрей на подветренной стороне конфигурации ELAC 1 визуализировались посредством впрыска флуоресцентной краски. По: (Stromberg, Limberg, 1993)

на вводимых в поток твердых или жидких микрочастицах, распределение концентрации которых обуславливается структурой исследуемых течений. Когерентный источник света формируется в виде тонкой световой плоскости, что, собственно, и дало название методу. Интересно, что с точки зрения обеспечения необходимой контрастности изображения очень эффективными оказываются микрочастицы обычной воды (туман).

При определенных условиях ядра вихрей могут разрушаться, что уменьшает подъемную силу крыла. Этот процесс, называемый срывом вихря, развивается

по типу «пузырь» или «спираль», визуальные различия между которыми демонстрирует фотография, сделанная с помощью впрыска флуоресцентной краски. Обычно пузырьковый режим срыва вихря предшествует распаду по спиральному типу.

Полезную информацию о спектрах сверхзвукового обтекания летательных аппаратов дает *теневогой метод Теплера*. С его помощью визуализируются неоднородности в газовых потоках, при этом особенно хорошо видны скачки уплотнения и *волны разрежения*.

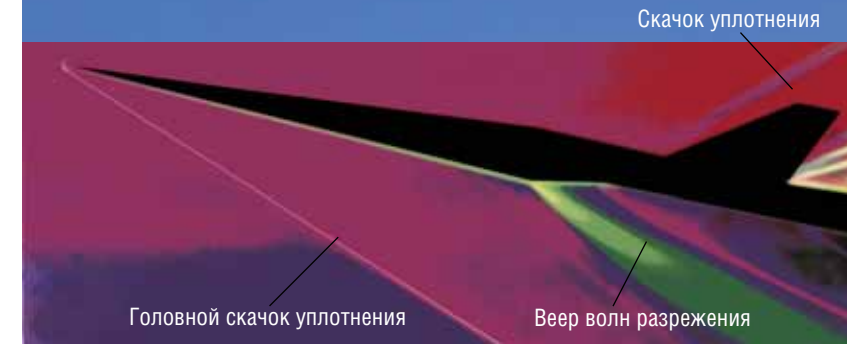


ТЕНЕВОЙ МЕТОД ТЕПЛЕРА

Еще в 1867 г. немецкий ученый А. Теплер предложил метод обнаружения оптических неоднородностей в прозрачных средах, который до сих пор не потерял актуальности в науке и технике. В частности, он широко применяется для исследования распределения плотности воздушных потоков при обтекании моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах.

Оптическая схема одной из реализаций метода представлена на рисунке. Пучок лучей от щелевого источника света системой линз направляется через исследуемый объект и фокусируется на кромке непрозрачной ширмы (так называемый *нож Фуко*). Если в исследуемом объекте нет оптических неоднородностей, то все лучи задерживаются ножом. При наличии неоднородностей лучи будут рассеиваться, и часть их, отклонившись, пройдет выше кромки ножа. Поставив за плоскостью ножа Фуко проекционный объектив, можно спроектировать эти лучи на экран (направить в фотокамеру) и получить изображение неоднородностей.

Рассмотренная простейшая схема позволяет визуализировать *градиенты плотности* среды, перпендикулярные кромке ножа, градиенты же плотности по другой координате приводят к смещению изображения вдоль кромки и не меняют освещенности экрана. Существуют различные модификации метода Теплера. Например, вместо ножа устанавливается оптический фильтр, состоящий из параллельных полосок разных цветов. Или используется круглая диафрагма с цветными секторами. В этом случае при отсутствии неоднородностей лучи из разных точек проходят через одно и то же место диафрагмы, поэтому все поле окрашено в один цвет. Появление неоднородностей обуславливает отклонение лучей, которые проходят через разные секторы, и изображения точек с различным отклонением света окрашиваются в соответствующие цвета.

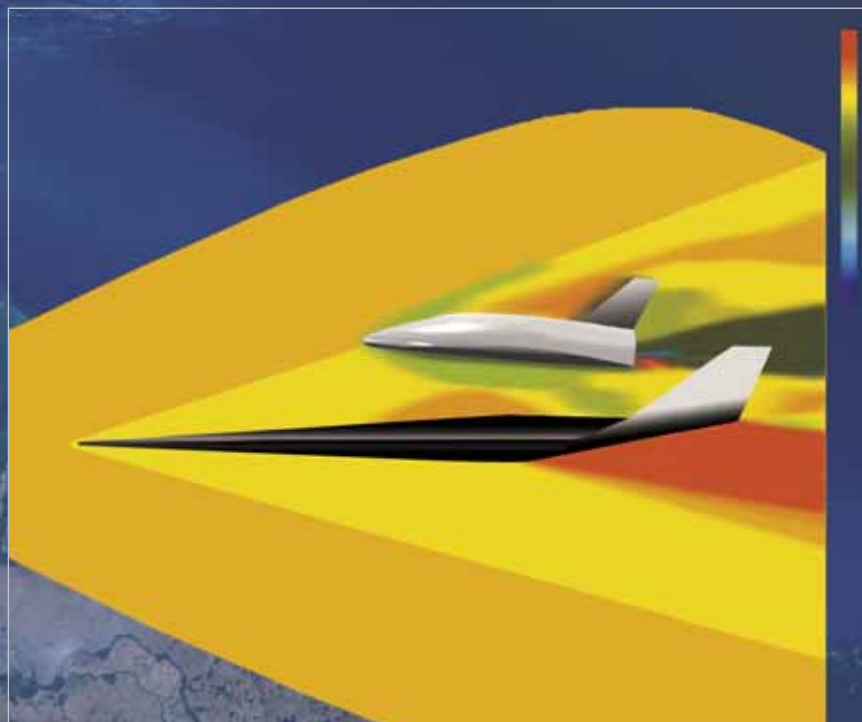


Эта теневая картина обтекания модели ELAC 1 получена оптическим методом Теплера в сверхзвуковой аэродинамической трубе в Ахене. По: (Hänel et al., 1993)



Теневая фотография обтекания модели ELAC 1 с воздухозаборником в гиперзвуковой ударной трубе ($M = 7,3$) в Ахене. Красивые радужные сполохи в правой нижней части снимка представляют собой хаотическое течение внутри воздухозаборника. По: (Оливье и др., 1996)




 M_a

4,40

3,80

3,20

2,60

2,00

1,40

Теоретическое распределение чисел Маха (скоростей) при обтекании двухступенчатой конфигурации ELAC–EOS (число Маха набегающего потока $M = 4,04$). По: (Брейтсамтер и др., 2005)

Разделение ступеней

Разделение несущей и орбитальной ступеней – одна из самых трудных задач, рассмотренных в ходе работы над проектом ELAC–EOS. В целях безопасности маневрирования этот этап полета требует особенно тщательного изучения. Численные исследования его различных фаз были проведены в центре SFB 255 при Техническом университете Мюнхена, а вся экспериментальная работа выполнена в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН. Испытания в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-313 включали в себя визуализацию обтекания полной конфигурации и измерения аэродинамических характеристик и поверхностных давлений в процессе разделения ступеней.

Модель нижней ступени ELAC 1С отличалась от первоначального варианта ELAC 1 отсеком небольшой глубины, в котором должна располагаться орбитальная ступень во время взлета и набора высоты. Компьютерное моделирование проводилось при числе Маха набегающего потока $M = 4,04$, числе Рейнольдса $Re = 9,6 \cdot 10^6$ и нулевом угле атаки модели EOS.

Наблюдалось хорошее согласие между расчетными и экспериментальными данными, что подтверждает надежность численного решения при прогнозировании гиперзвуковых течений. Пример расчетной картины распределения чисел Маха (скоростей) в потоке во время процесса разделения представлен на этой странице. На обеих ступенях видны скачки уплотнения и локальные разрежения. У задней части конфигурации ELAC 1С в реальности разрежения не будет, поскольку там разместится гиперзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель.

В целом можно сказать, что исследования аэродинамической концепции двухступенчатой системы ELAC–EOS, инициированные Немецким исследовательским обществом DFG, оказались успешными. В результате обширного комплекса теоретических и экспериментальных работ, в которых участвовали научные центры Европы, Азии, Америки и Австралии, был выполнен полный расчет конфигурации, способной к горизонтальному взлету и посадке в стандартном аэропорту, решены

аэродинамические задачи полета с низкими, сверхзвуковыми и особенно гиперзвуковыми скоростями.

В настоящее время ясно, что создание перспективного аэрокосмического транспорта требует еще детальных исследований по разработке гиперзвуковых воздушно-реактивных двигателей, надежно работающих в широком диапазоне скоростей полета, высокоточных систем управления процессами разделения ступеней и посадки орбитального модуля, новых высокотемпературных материалов и т.д. Решение всех этих сложных научно-технических задач невозможно без объединения усилий ученых разных стран. И опыт данного проекта только подтверждает: долговременное международное сотрудничество становится неотъемлемым элементом аэрокосмических исследований.

Литература

Kharitonov A.M., Krause E., Limberg W. et al. // *J. Experiments in Fluids*. – 1999. – V. 26. – P. 423.

Brodetsky M.D., Kharitonov A.M., Krause E. et al. // *J. Experiments in Fluids*. – 2000. – V. 29. – P. 592.

Brodetsky M.D., Kharitonov A.M., Krause E. et al. // *Proc. at X Int. Conference on the Methods of Aerophysical Research. Novosibirsk*. – 2000. – V. 1. – P. 53.

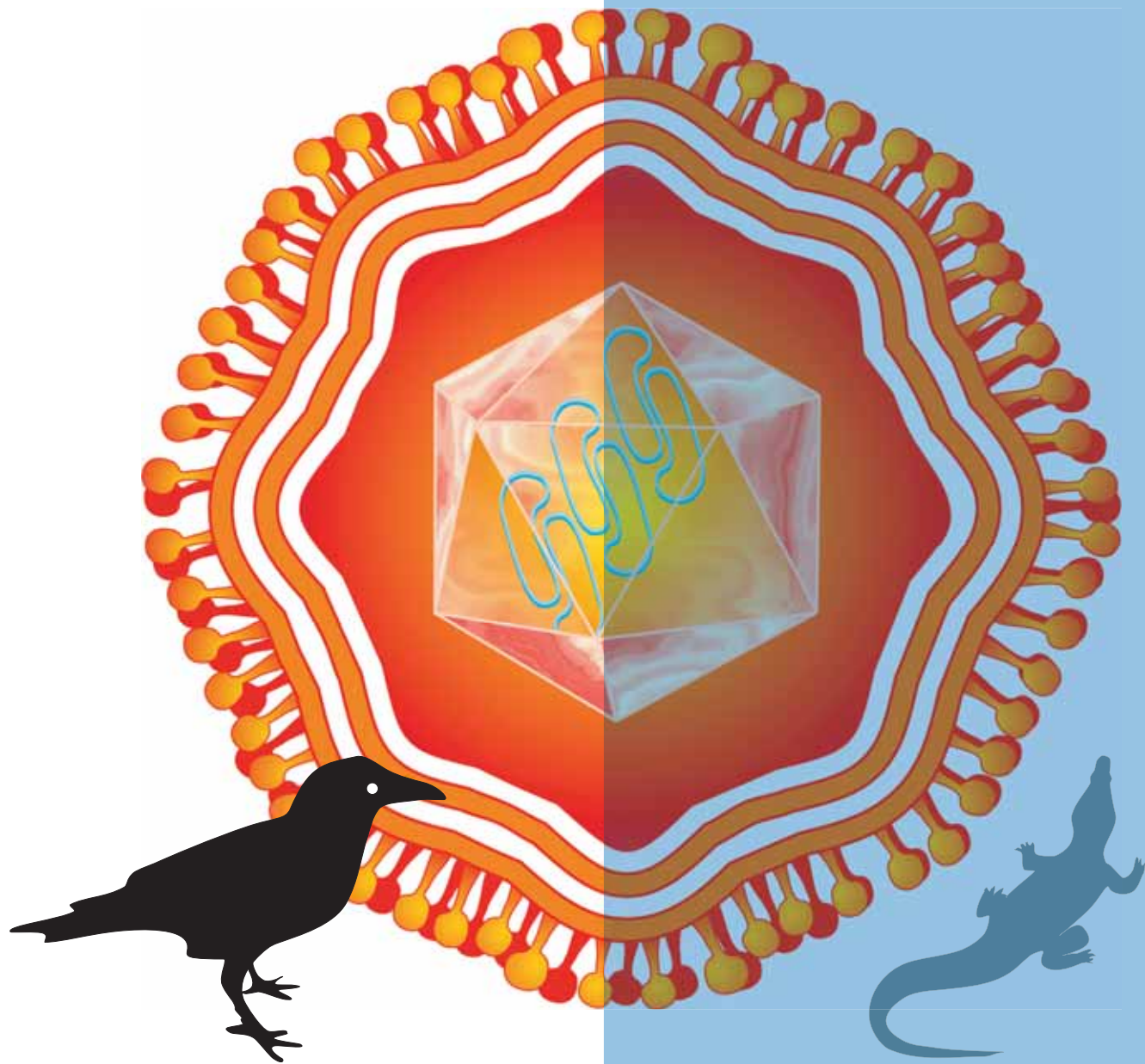
Krause E., Brodetsky M.D., Kharitonov A.M. // *Proc. at WFAM Congress. Chicago, 2000*.

Бродецкий М.Д., Краузе Э., Нукифоров С.Б. и др. // *ПМТФ*. – 2001. – Т. 42. – С. 68.

Авторы и редакция благодарят О. Ильмаза (Аэродинамический институт Рейн-Вестфальской технической высшей школы в Ахене, Германия) за помощь в подготовке иллюстраций

В. Б. ЛОКТЕВ

ВИРУС ЗАПАДНОГО НИЛА: КРУГОСВЕТКА



В последние десятилетия над человечеством нависла почти «инопланетная» угроза. Речь идет о вирусах – наиболее просто устроенных мельчайших организмах, возможно – внеземной природы, о которых ученые до сих пор спорят: «существа» это или «вещество»? Последний из претендентов на нашу жизнь и здоровье – всемирно знаменитый новый геновариант свиного гриппа. Вирус Западного Нила, к счастью, не так известен. Пока. Но судя, например, по публикации на Новосибирском городском сайте, у него все впереди. Недаром сообщение о нильской лихорадке на берегах Оби побило рекорды популярности, оставив позади даже фоторепортаж с шоу купальников



ЛОКТЕВ Валерий Борисович – доктор биологических наук, профессор, заведующий отделом молекулярной вирусологии флавивирусов и вирусных гепатитов ГНЦ ВБ «Вектор». Автор и соавтор более 300 научных работ

Лихорадка Западного Нила на берегах Оби – не правда ли, звучит необычно? Тем не менее, название этой прежде неведомой в Сибири болезни, вызываемой одним из *флавивирусов*, стало все чаще встречаться в лексиконе наших ученых и медиков.

Почему так произошло? Действительно, долгие годы считалось, что *вирус Западного Нила* (ВЗН) распространен преимущественно в Африке, причем и там он не способен вызвать значимые вспышки заболевания среди местного населения. Однако осенью 1999 г. произошло событие, полностью поменявшее отношение ученых к этому инфекционному агенту: вспышки лихорадки Западного Нила были одновременно зафиксированы в Волгограде и Нью-Йорке – городах, разделенных многими тысячами километров и Атлантическим океаном (Campbell et al., 2002).

Это стало отправной точкой в современной истории вируса Западного Нила, вошедшего в категорию так называемых *вновь возникающих инфекций*, список которых в конце прошлого и начале нынешнего столетий пополнялся практически ежегодно.

Заложники природы

Благодаря успехам, достигнутым в микробиологии и медицине, в середине XX в. казалось, что близка полная победа над инфекционными заболеваниями. Но уже в 1970-е гг. стало ясно, что ни вакцины, ни антибиотики или иммуностимуляторы типа интерферона не могут полностью искоренить этот давний бич человечества. На сегодня удалось победить практически только одну инфекционную болезнь – оспу.

И все же вышеперечисленные средства профилактики и лечения наряду с улучшением качества жизни населения развитых стран позволили почти в 100 раз снизить смертность от инфекций (Lederberg, 1997). Несмотря на эти, безусловно, значимые достижения медицины, смертность от инфекционных заболеваний, по данным ВОЗ, занимает второе место в скорбном списке общей смертности от болезней. За этой цифрой стоит около 15 миллионов человек, ежегодно умирающих от инфекций, – почти в два раза больше, чем от рака.

Более того, в последние годы ученые все чаще стали обнаруживать новые, причем очень опасные, инфекции. Только за последние тридцать лет было описано более четырех десятков новых заболеваний и их возбудителей. Среди них такие широко известные вирусы, как Марбурга, Эбола, гепатита С, иммунодефицита человека, атипичной пневмонии, птичьего гриппа; а также вирусы, названия которых знакомы только специалистам, – Нипа, Хендра, Алькурхма и т. д. Так и появился термин – *новые и вновь возникающие инфекции* (Mogens et al., 2004). Наиболее свежим примером можно считать

Вирус Западного Нила был открыт в 1937 г. в Уганде. В этом же году на Дальнем Востоке советские вирусологи под руководством Л. А. Зильбера открыли вирус клещевого энцефалита. Оба вируса относятся к одному роду и семейству – флавивирусам, названным в честь вируса желтой лихорадки (от лат. *flavus* – желтый). Сегодня известно около 70 видов флавивирусов, большинство из которых способно вызывать тяжелые заболевания человека и домашних животных



Частица вируса Западного Нила размером около 50 нм состоит из небольшой молекулы одноцепочечной РНК, трех видов белков и липидной оболочки. Один белок вместе с РНК формирует нуклеокапсид, два других, погруженных в вирусную мембрану, – оболочку. В РНК-геноме закодирована одна большая молекула полипротеина, которая после своего синтеза расщепляется на десять разных белков, необходимых для жизнедеятельности вируса в клетке хозяина

где их циркуляция поддерживается благодаря существованию взаимосвязей между переносчиками – кровососущими насекомыми и различными видами животных, являющихся природными «резервуарами» для инфекции. Человек, как правило, – случайная жертва, и сам вирус не распространяет. Отметим, что сегодня флавивirusы способны образовывать очаги инфекции не только в природных экосистемах – все чаще от этих заболеваний страдают жители мегаполисов.

Из Средиземноморья – в Америку

Первым толчком для изучения ареала вируса Западного Нила стали локальные вспышки заболевания в Израиле, зарегистрированные в середине 50-х гг. прошлого столетия.

Довольно быстро выяснилось, что вирус широко распространен в Африке, встречается также на юге Европы и в Азии. Передаваясь человеку через укус комара, он вызывает доброкачественную лихорадку, которая заканчивается выздоровлением через несколько дней.

Судя по эволюционному дереву, построенному впоследствии на основе вирусологических и генетических исследований, ВЗН достаточно давно распространился по большим территориям трех континентов, сформировав природные очаги в экосистемах различных типов. Особой опасности для человека и животных эти штаммы вируса не представляли.

Сегодня уже не узнать, что стало непосредственной причиной появления в районе Средиземного моря нового генетического варианта вируса. Большинство исследователей сходится на том, что его история началась со вспышки в Алжире в 1994 г., когда было зарегистрировано 50 случаев заболевания, причем 8 человек погибли от тяжелого вирусного энцефалита. Следующая вспышка была зафиксирована через два года в Румынии (453 случая при смертности около 9%). К сожалению, эти события не привлекли особого внимания и фактически остались вне поля зрения ученых.

Сомнительная слава пришла к вирусу Западного Нила в 1999 г., когда он впервые попал в Россию (Волгоград и Астрахань) и, что принципиально важно, на американский континент. После этого ему потребовалось всего три года, чтобы захватить практически всю территорию США и юг Канады. Еще несколько лет ушло на «покорение» Центральной и Южной Америки. И сегодня в США и Канаде ежегодно регистрируются тысячи случаев тяжелых заболеваний, вызываемых ВЗН.

А что в России? Через три года после вспышки в Поволжье вирус объявился в Западной Сибири (юг Новосибирской области). Обнаружили его сначала у перелетных птиц, но вскоре были выявлены и первые



Вирус Западного Нила, как и многие другие флавивirusы, формирует природные очаги. В очаге вирус циркулирует, в основном, между птицами и кровососущими насекомыми. Другие животные для вируса – случайные хозяева. Они могут быть инфицированы, но, как правило, сами не являются звеном в передаче инфекции, поскольку концентрация вирусных частиц в их крови обычно невысока

обнаруженный в этом году вариант вируса свиного гриппа H1N1.

Открытие каждой новой инфекции сопряжено с решением целого комплекса научных и прикладных задач. И прежде всего речь идет о создании специфических средств диагностики, профилактики и лечения.

В проблему новых и вновь возникающих инфекций внесли немалый вклад *флавивirusы* – семейство вирусом с РНК-геномом, многие из которых поражают широкий круг хозяев из беспозвоночных и позвоночных животных. Наиболее эпидемиологически значимыми среди флавивirusов традиционно считаются вирусы денге, желтой лихорадки, японского и клещевого энцефалитов (Monath et al., 1995). Эти вирусы, особенно вирус денге, ежегодно вызывают заболевания сотен миллионов человек в различных странах мира, причем при некоторых формах заболевания смертность составляет десятки процентов!

Характерная особенность флавивirusов, к которым относится и вирус Западного Нила, заключается в формировании так называемых *природных очагов*,

случаи заболевания человека. Примерно в это же время присутствие вируса было зарегистрировано и в Приморском крае (Терновой и др., 2007).

Фактически это означало, что «средиземноморский» вирус, в течение нескольких лет совершивший почти кругосветное путешествие, широко распространился по миру, захватив все обитаемые континенты, кроме Австралии.

Генетическое расследование

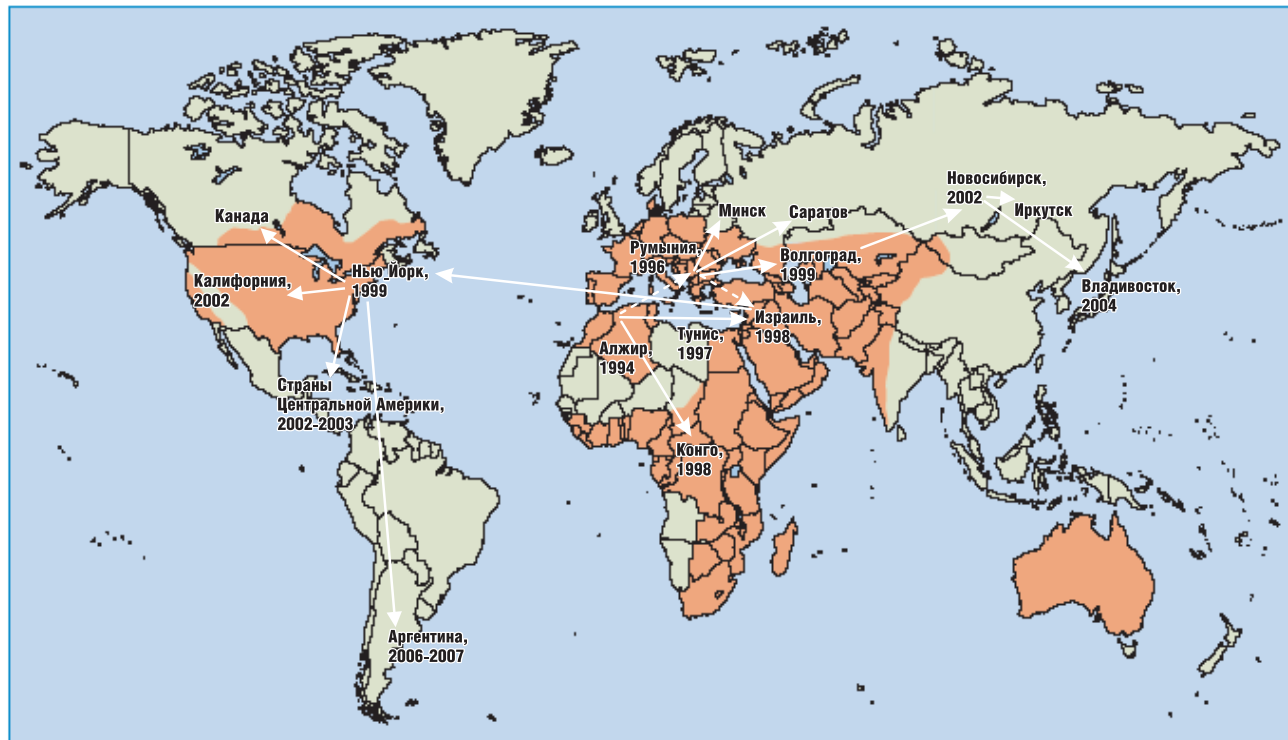
Столь «агрессивное» поведение, продемонстрированное новым вариантом вируса Западного Нила, совершенно нетипично для флавивirusов, циркуляция которых подразумевает наличие постоянного природного очага заболевания. А на его формирование требуется время.

С чем же связано такое поистине стремительное распространение вируса? Во-первых, вирус передавался буквально «на крыльях» благодаря своей способности до 200 дней сохраняться в организме перелетных птиц.

Во-вторых, огромную роль сыграла «неразборчивость» вируса, способного размножаться в сотнях видах птиц, в десятках видов комаров, клещей, в млекопитающих и даже в рептилиях! С феноменальной легкостью преодолевая межвидовые барьеры, новый штамм сформировал очаги в самых разнообразных климатических зонах.

Среди менее значимых, но, безусловно, важных факторов, повлиявших на скорость распространения вируса, можно назвать климатические и природные изменения, в том числе связанные с деятельностью человека.

Чувствительны к вирусу Западного Нила комары (более 40 видов); клещи, в том числе иксодовые – переносчики клещевого энцефалита; птицы (более 300 видов, особенно вороны) и другие позвоночные (более 300 видов – амфибии, рептилии и млекопитающие, в том числе человек)



■ – распределение ВЗН «традиционного» генотипа
 → – пути распространения нового генотипа ВЗН

За несколько лет генотип вируса Западного Нила, предположительно появившийся в 1994 г. в Алжире, практически совершил кругосветное путешествие, распространившись в странах Африки, Северной и Южной Америки, Европы и Азии.

Столь необычные эпидемиологические данные стимулировали активное исследование наследственного материала возбудителя. Генетический анализ довольно быстро позволил реконструировать путь распространения ВЗН.

Было установлено, что вспышка заболевания в Румынии в 1996 г. действительно была вызвана ВЗН с современным генотипом (генетический анализ алжирского штамма 1994 г. не проводился). Из Румынии вирус попал в Израиль. Далее он пересек Атлантический океан (предположительно используя воздушные средства – комаров в салонах самолетов) и достиг США и Канады, за которыми последовали страны Центральной и Южной Америки. Другой путь вируса лежал из Румынии на юг России и далее на тихоокеанское побережье Азии.

Исследователи выявили еще одну удивительную характеристику нового варианта ВЗН – чрезвычайную консервативность его генома, что совершенно не характерно для подавляющего большинства других вирусов, также имеющих РНК-геном.

Уровень генетических отличий между разными образцами вируса оказался настолько мал, что стало возможно оценивать генетическую *дивергенцию* (расхождение) ВЗН в специфических условных единицах – количестве новых мутаций на каждые 1000 км преодоленного расстояния.

Оказалось, что эта величина часто не превышает нескольких сотых процента на тысячи километров пути! Для сравнения добавим, что уровень генетических различий между, например, сибирским и дальневосточным вариантами вируса клещевого энцефалита может достигать 18–20%.

Вирусная рулетка

Беспрецедентная для флавивирусов генетическая стабильность ВЗН позволила говорить о том, что вся современная мировая «популяция» этого вируса фактически представляет собой потомство одного клона, зародившегося в районе Средиземного моря.

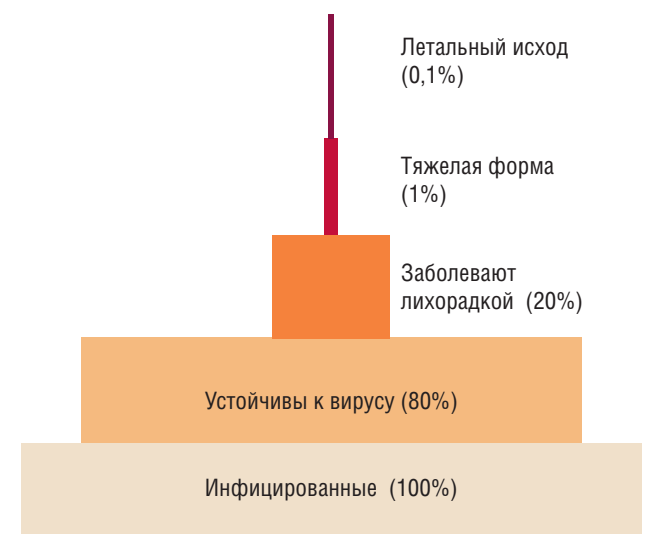
Очевидно, что именно изменения в нуклеотидной последовательности генома вируса предопределили его необычную способность поражать большое число видов комаров, птиц и млекопитающих. Но поскольку суммарные генетические отличия нового штамма от предшествующих слишком малы (не более 5%), пока не удалось выявить те критические мутации, которые предопределили современное распределение вируса в природных экосистемах различных континентов.

Гибель белых медведей от ВЗН, зарегистрированная в Канаде, показывает, что потенциал вируса в отношении экспансии новых экосистем далеко не исчерпан. Не исключено, что с перелетными птицами он может попасть даже в Антарктиду.

Как говорилось выше, человек чувствителен к новому генотипу вируса. Большая часть заболеваний людей регистрируется во второй половине лета и осенью. Инкубационный период после укуса зараженным комаром составляет 4–8 дней. Болезнь, начинающаяся с повышения температуры, чаще всего развивается в лихорадку различной степени тяжести и продолжительности. Эта форма заболевания очень похожа на обычный грипп, поэтому ее часто диагностируют неправильно.

У части заболевших развивается вирусный энцефалит и менингоэнцефалит – тяжелые формы заболевания, требующие госпитализации. Клиника в этих случаях очень напоминает таковую при клещевом энцефалите. Прогноз также схож: смертность до 10% и более. При этом дети болеют существенно легче в отличие от лиц старшего и пожилого возраста.

Но заражение не обязательно заканчивается заболеванием: как правило, из десяти инфицированных у 8–9 человек болезнь не развивается или проходит



Существует предположение, что низкая чувствительность к вирусу Западного Нила и другим флавивирусам, например вирусу клещевого энцефалита, у людей предопределена генетически. Однако гены, обеспечивающие подобную устойчивость, пока не обнаружены

в бессимптомной форме. Хотя здоровью этих людей ничего не угрожает, они могут представлять опасность для других в случае сдачи крови, а также если их органы будут использованы для трансплантации. Смертельные исходы после переливания крови или пересадки органов побудили правительство США ввести обязательный тест на ВЗН для препаратов крови и донорских органов.

На русских берегах

В нашей стране лихорадка Западного Нила обычно ассоциируется с районом Каспийского моря и дельтой Волги (Lvov et al., 2002). Согласно выборочным серологическим исследованиям, большинство местного населения этих районов переболело ей в той или иной форме. И сегодня в этом регионе ежегодно регистрируются тяжелые формы заболевания, требующие лечения в условиях стационара.

Серологические выборки на юге Сибири и в Приморском крае показывают, что почти каждый пятый здесь был инфицирован или переболел.

К сожалению, случаи правильной диагностики лихорадки Западного Нила остаются единичными. Для решения этой проблемы специалисты новосибирского ГНЦ ВБ «Вектор» в содружестве с ЗАО «Вектор-Бест» разработали и выпускают наборы для диагностики заболевания у людей, а также для наблюдения за циркуляцией вируса в природе. Эти диагностические средства уже используются в различных регионах страны и заслужили высокую оценку.

Но если вопросы диагностики этого относительно нового для нас заболевания практически решены, то с его лечением и профилактикой ситуация совершенно иная. Существующие противовирусные препараты обладают довольно низкой эффективностью против ВЗН.

У большинства людей, инфицированных вирусом Западного Нила, болезнь себя не проявляет – лишь спустя время у них можно обнаружить антитела в сыворотке крови. У пятой части инфицированных развивается лихорадка и только у одного из 100–150 заболевших – энцефалит или менингоэнцефалит. Смертность среди тяжело заболевших достигает 10% и более. Схожая клиническая картина наблюдается и для вируса клещевого энцефалита

Начиная с 1999 г. в мире ежегодно публикуются сотни статей, посвященных вирусу Западного Нила. Отечественные ученые также достигли определенных успехов в исследованиях нового геноварианта вируса. Заслуга сибирских вирусологов состоит в обнаружении факта распространения ВЗН в азиатскую часть России. Сообщения о появлении вируса в Приморском крае вызвали в научной среде некоторое недоверие (Терновой и др., 2006), однако факт циркуляции ВЗН в Дальневосточном регионе был затем подтвержден московскими (2007 г.) и японскими (2008 г.) исследователями. Сибирские ученые провели генотипирование вируса в азиатской части страны, разработали наборы для диагностики лихорадки Западного Нила, а также метод генной терапии для профилактики и лечения тяжелых форм заболевания



Наборы для диагностики вируса Западного Нила, разработанные сибирскими учеными несколько лет назад, сегодня полностью обеспечивают потребности рынка РФ. На фото – наборы для генетической диагностики ВЗН производства ЗАО «Вектор-Бест» совместно с ГНЦ «Вектор» (Новосибирск)

В настоящее время разработаны вакцины и вируснейтрализующие антитела, способные эффективно защищать от таких флавивирусов, как японский и клещевой энцефалит, однако против вируса Западного Нила подобных средств не существует. Причина проста: до появления нового геноварианта вируса потребности в этих препаратах не было.

Вакцино- и иммунопрофилактика лихорадки Западного Нила представляет сегодня проблему не только для нашей страны, но и для всего мира. Интенсивные исследования в этом направлении ведутся во многих лабораториях и научных центрах.

Так, сотрудниками «Вектора» был предложен новый метод профилактики и лечения инфекции на основе генной терапии. Идея предложенного подхода проста: обеспечить в организме синтез высокоэффективных вируснейтрализующих белков-антител на самых ранних стадиях заболевания, когда иммунная система сама еще не способна их синтезировать (Pereboev et al., 2008).

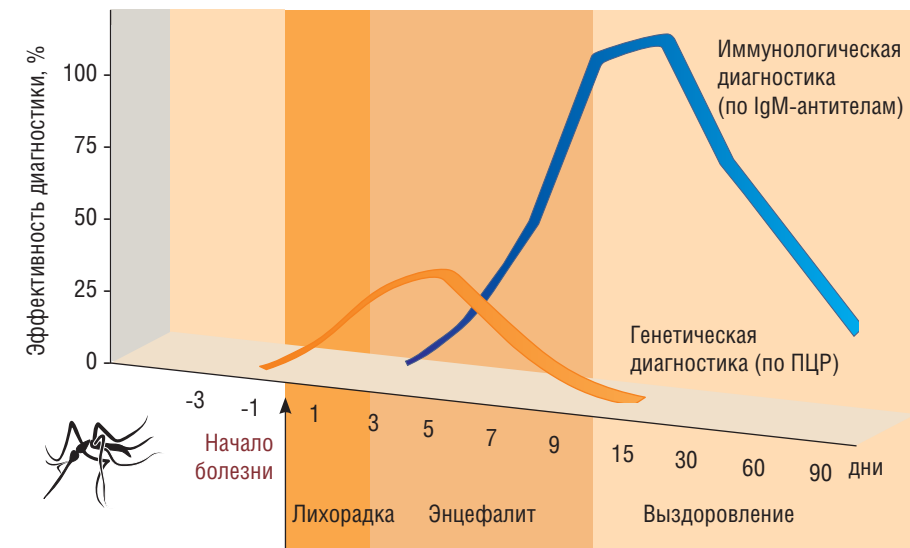
Дальнейшее было, как говорится, делом техники. Участок ДНК, кодирующий активный центр вирусней-

трализующих антител, был встроен в ген, кодирующий иммуноглобулин IgG — основной класс человеческих защитных антител. Модифицированный ген был, в свою очередь, встроен в специальную генетическую конструкцию – носитель, использующийся для генной терапии.

В результате получился препарат, однократное введение которого в дозе несколько наногرامмов должно обеспечить синтез в организме человека антител в количестве, достаточном для нейтрализации вируса. При этом защитное действие препарата сохраняется в течение трех и более недель.

Проверка на животных показала высокую эффективность подобной генотерапии для профилактики и лечения лихорадки Западного Нила. Однако не стоит ожидать, что новый метод будет немедленно внедрен в практику: потребуются несколько лет напряженной работы, чтобы провести дополнительные испытания препарата и разработать технологию его производства.

Отметим, что такой подход может быть успешно использован для лечения и других тяжелых флавивирусных инфекций, в частности клещевого энцефалита.



Диагностика лихорадки Западного Нила строится на иммунологической и генетической детекции маркеров этой вирусной инфекции. Наибольшей эффективностью обладает тест на специфические защитные антитела (IgM) в сыворотке крови. Эффективность метода ПЦР-диагностики, основанного на обнаружении вирусной РНК, значительно ниже и падает практически до нуля через неделю после начала заболевания. Это связано с крайне низкой концентрацией вирусных частиц в крови и очень коротким периодом вирусносительства у человека. По: (Solomon, 2003)

Как и в случае с большинством инфекций, это лишь вопрос времени и финансирования.

Сегодня уже не вызывает сомнения, что вирус Западного Нила представляет реальную угрозу для населения и домашних животных обширных регионов юга России. Недавнее появление его в Новосибирской области стало неприятной неожиданностью для сибиряков. Вирус пополнил и без того немалый список высокопатогенных флавивирусов, циркулирующих на юге Сибири, куда входят вирусы клещевого энцефалита и омской геморрагической лихорадки.

Поскольку многие флавивирусы переносятся птицами, то можно ожидать появления на юге Сибири и других опасных болезней. Поэтому необходимо и дальше продолжать мониторинг уже известных природных очагов инфекций и выявлять новые; исследовать характер и направление эволюционных преобразований геномов инфекционных агентов, с тем чтобы совершенствовать методы диагностики, профилактики и лечения.

Ведь недаром говорится: кто предупрежден — тот вооружен. Невозможно без полного разрушения естественных экосистем окончательно искоренить инфекции, чье существование поддерживается действием ряда природных механизмов. Но в наших силах минимизировать ущерб, причиняемый ими здоровью и жизни человека.

Литература

Терновой В.А. и др. Выявление случаев лихорадки Западного Нила в Новосибирской области в 2004 году и генотипирование вируса, вызвавшего заболевание // Вестник РАМН, 2007. – № 1. – С. 21–26.

Терновой В.А. и др. Генотипирование вируса Западного Нила, выявленного у птиц на юге Приморского края в течение 2002–2004 годов // Молекулярная генетика, микробиология и вирусология, 2006. – № 4. – С. 30–35.

Pereboev V. et al. Genetically delivered antibody protects against West Nile virus // Antiviral Research, 2008. – V. 77(1). – P. 6–13.

Как читают гены



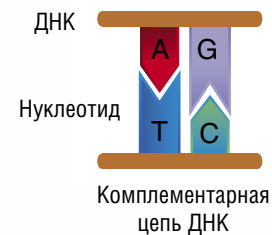
МОРОЗОВ Игорь Владимирович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН (Новосибирск), руководитель Центра коллективного пользования «Секвенирование ДНК». Сфера научных интересов: сравнительная и медицинская геномика. Автор и соавтор более 40 научных публикаций

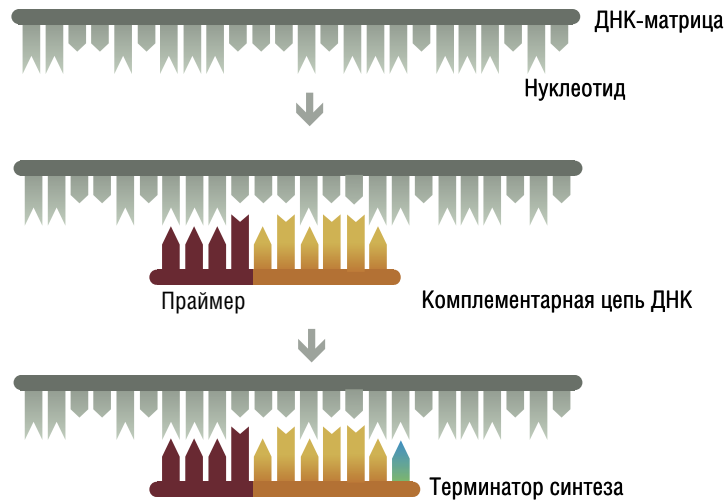
Научные методы, методики, технологии... Зачем их вообще нужно рассматривать, да еще далекому от науки человеку? Но «бытие определяет сознание», как верно говорил классик марксизма-ленинизма, а бытие ученого – это, прежде всего, инструменты и методы, которыми он пользуется. Они же в каждый конкретный момент определяют пределы возможного и доступного... Истоки современных методов чтения наследственной информации лежат в конце 60-х – начале 70-х гг. прошлого века. И путь был тернист: здесь сталкивались «романтики», готовые неопределенное время искать совершенного «журавля в небе», и прагматики, требовавшие прогресса – пусть небольшого, но в обозримом будущем. И может быть, точка в этом споре поставлена лишь временно...

На заре генетики гены – материальные носители наследственности, определяющие признаки и особенности организма, – были такой же абстракцией, как и эфир в физике. Возможность «читать гены», т.е. определять нуклеотидные последовательности ДНК и РНК, изменила генетику до неузнаваемости, фактически создав новую науку – геномику. О революционном значении этого события свидетельствует хотя бы присуждение в 1980 г. Нобелевской премии по химии английским исследователям У. Гилберту и Ф. Сэнгеру, разработавшим в 1970-е гг. методы определения нуклеотидных последовательностей, названные в честь их авторов и широко используемые до сих пор.

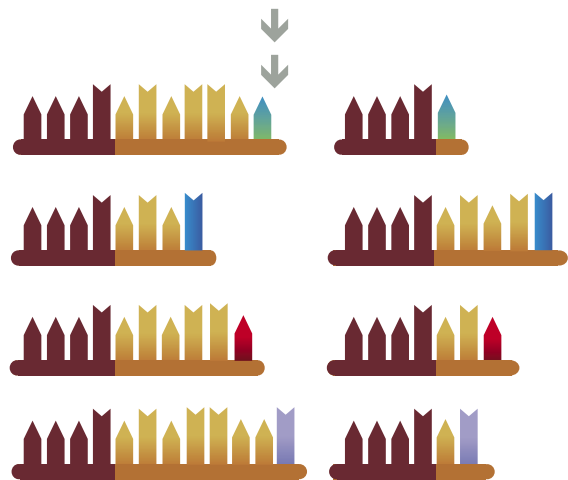
Все современные технологии «чтения» ДНК основаны на ее удивительном свойстве – комплементарности. Одиночная нить ДНК представляет собой природный полимер – «бусы», состоящие из 4-х видов бусинок-нуклеотидов: аденина (А), тимина (Т), гуанина (G) и цитозина (С). Нуклеотиды и являются «буквами» генетического кода: каждый триплет кодирует одну аминокислоту; а последовательность нуклеотидов, называемая геном, – один белок.

Две нити ДНК удерживаются вместе за счет взаимодействий между неслучайными парами нуклеотидов, подходящих друг другу, как ключ к замку: А – к Т, G – к С. Благодаря этому на нити ДНК может быть синтезирована дочерняя комплементарная цепь. Таким способом происходит как копирование генетической информации, так и считывание ее для синтеза белка





- ◀ I К множеству копий исследуемой ДНК добавляется смесь из праймера (стартового фрагмента), 4-х типов дезоксирибонуклеотидтрифосфатов (dNTP), соответствующих 4-м буквам генетического кода, и 4-х типов «испорченных букв» – дидезоксирибонуклеотидтрифосфатов (ddNTP)
- ◀ II На ДНК-матрицах из dNTP синтезируются новые комплементарные цепи ДНК
- ◀ III Синтез ДНК прекращается как только вместо dNTP будет использована «испорченная буква» ddNTP – терминатор синтеза



- ◀ IV Терминаторы синтеза включаются в растущую цепь случайным образом, поэтому в результате ряда реакций, аналогичных II—III, формируется большой пул новых цепей ДНК разной длины, каждая – с одним из терминаторов синтеза на конце

Расшифрованная последовательность

Спектр

Детектор флуоресценции

Мигрирующие фрагменты ДНК

Лазер

Схема секвенирования ДНК по Сэнгеру.

Этот метод легко автоматизируется за счет использования капиллярного электрофореза. Для облегчения детекции в терминаторы синтеза включаются метки, различающиеся спектром флуоресценции. В результате на выходе получается своеобразная разноцветная «гребенка», цвета зубцов которой соответствуют «буквам» ДНК



Начало нового века ознаменовалось очередным витком в развитии геномных исследований. Что ни день, то расшифровываются геномы все новых и новых организмов, причем найти неизученные объекты становится непросто: исследователи в шутку сетуют, что скоро *секвенировать* (так называют определение нуклеотидных последовательностей) будет нечего. Одновременно значительно расширились сферы применения секвенирования. Теперь это инструмент для самых разнообразных исследований: от поиска маркеров наследственных заболеваний до оценки разнообразия организмов, населяющих те или иные экосистемы.

Такие успехи в расшифровке геномов были достигнуты благодаря, в первую очередь, экстенсивному развитию традиционных методов секвенирования ДНК и созданию многочисленных центров «чтения геномов». Располагая многочисленным квалифицированным персоналом, они в каком-то смысле являются аналогами мануфактур, где автоматизация затронула лишь последние стадии «производственного процесса».

И хотя основные результаты «чтения геномов» были получены и до сих пор получаются именно в таких центрах, ученые всегда стремились к более полной, комплексной автоматизации, а в перспективе – даже к полностью роботизированному «производству».

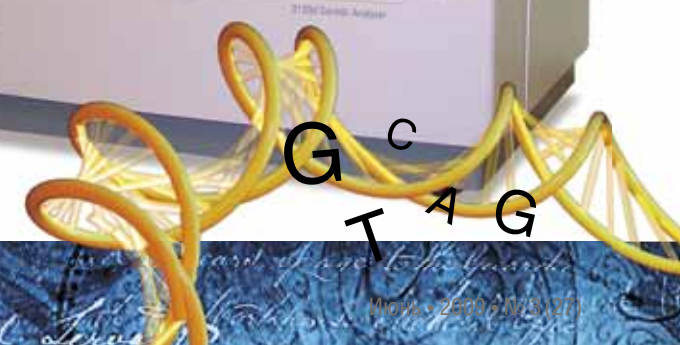
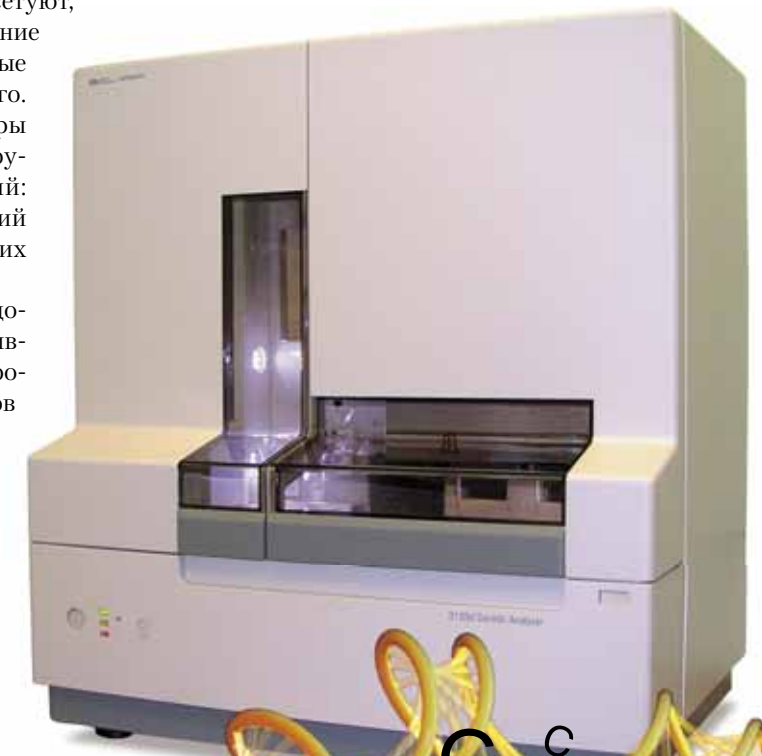
А теперь более подробно остановимся на всех этапах эволюции методов «чтения» наследственно-

Геном на вес золота

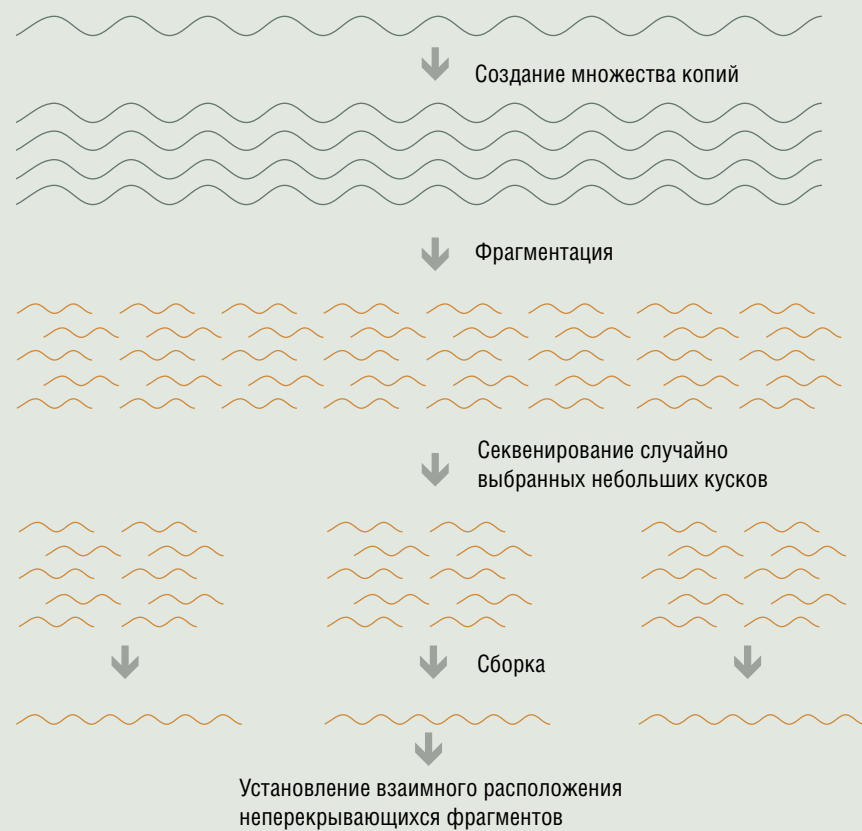
Так называемая реакция Сэнгера, лежащая в основе ставшего классическим метода «чтения ДНК», заключается в том, что на исследуемом фрагменте ДНК (*матрице*) синтезируется ряд дочерних цепей разной длины. Все они оканчиваются особым нуклеотидом-терминатором, комплементарным одной из «букв» матрицы. При этом терминаторы помечены разными флуоресцентными метками, благодаря чему возможна их детекция.

Здесь следует заметить, что большинство объектов, с которыми имеют дело генетики, представляют собой весьма длинные нуклеотидные последовательности. Геномы бактерий, даже самых простых, редко бывают короче миллиона пар оснований. Геном человека – более 3 млрд пар оснований, и даже относительно небольшая нуклеотидная последовательность генома человеческой митохондрии (клеточной «электростанции», имеющей собственную наследственную информацию) превышает в длину 16 тыс. пар оснований.

Автоматический геномный анализатор производства ABI, работающий на основе реакции Сэнгера, может за 2,5 часа расшифровать последовательности длиной от 11 до 50 тыс. нуклеотидов



Фрагмент исследуемой ДНК



В одном эксперименте можно расшифровать лишь небольшой отрезок ДНК, поэтому крупные геномы приходится расчленять на множество относительно коротких перекрывающихся фрагментов. Именно из таких расшифрованных нуклеотидных последовательностей фрагментов и состоит, например, реальная физическая карта хромосом человека. На схеме – этапы секвенирования относительно большого фрагмента ДНК

Главным недостатком методов Сэнгера и Гилберта является жесткое ограничение на длину последовательности, определяемой в одном эксперименте, – не более 1000 пар оснований. Причем это ограничение вытекает из принципов метода, и в этом смысле оно неустранимо. Чтобы «читать» реальные геномы с помощью такого метода, необходимо сначала направленно «расчленив» исходные объекты на перекрывающиеся мелкие фрагменты, а затем из их последовательностей реконструировать исходную.

Для генома человека, например, число таких фрагментов должно составлять десятки миллионов! Подобное ограничение значительно осложняет расшифровку реальных геномов, а также создает трудности при попытках автоматизации этого процесса.

Нужно отметить, что сам анализ продуктов реакции Сэнгера легко автоматизируется за счет использования флуоресцентных меток и капиллярного электрофореза. Автоматизация позволила значительно снизить затраты труда на эту стадию. Однако длина определяемой в одном эксперименте последовательности при этом несколько уменьшилась: на заре становления методов эксперты читали до 1200–1500 «букв», современные автоматы – не более 700–900. Но дело даже не в том:

основной труд приходится как раз на «расчленение» исходной последовательности и последующую ее сборку.

Масштабы необходимых для этих операций людских и материальных ресурсов позволили в свое время сравнивать по затратам проект «Геном человека» с проектом высадки на Луну. Стоимость расшифровки первого чернового варианта генома человека, законченной в 2001 г., оценивалась в 300 млн долл., а его окончательный вариант вместе с разработкой необходимых технологий обошелся примерно на порядок дороже. Правда, черновой вариант третьего генома приматов (макаки-резуса), опубликованный в феврале 2007 г., стоил «всего» 22 млн долл.

Помимо огромной трудоемкости, процесс расчленения-сборки имеет еще один существенный недостаток – проблему аутентичности получаемых результатов. Сложно гарантировать, что все десятки миллионов фрагментов, получаемых многократным и многоэтапным копированием участков исходной ДНК, остаются ее точной копией.

Кстати сказать, первоначально опубликованная последовательность генома человека была «мозаичной», т. е. представляла собой своего рода «лоскутное одеяло»

из фрагментов геномов разных индивидуумов (по всей видимости, граждан разных стран и даже представителей разных рас). Правда, полагают, что основной вклад в эту мозаику внес геном Крейга Вентера, президента корпорации *Celera Genomics*.

Журавль или синица?

Все недостатки методов секвенирования ДНК стали очевидны сразу же после начала их практического применения. Поэтому правительство США направило большие силы и средства (даже из бюджета оборонного ведомства) на разработку альтернативных подходов, которые были бы свободны от ограничений на длину анализируемых фрагментов. Большинство таких подходов предполагало работу с одной молекулой ДНК, а не с набором ее копий-потомков, что одновременно снимало проблему аутентичности.

Первоначально наиболее известные проекты секвенирования единичных молекул ДНК без принципиальных ограничений на их длину предполагали использование двух подходов: сканирующую туннельную микроскопию либо последовательное отщепление нуклеотидных остатков от молекулы ДНК с помощью специального фермента *эндонуклеазы*.

С помощью туннельного микроскопа исследователи намеревались «заглянуть» в большую бороздку распластанной на подложке ДНК и «прочитать» последовательность, используя разницу в геометрии отдельных «букв»-оснований. К сожалению, разрешающей способности этого метода оказалось недостаточно, хотя сегодня он широко используется, например, для детального исследования комплексов ДНК с различными (в том числе и совсем небольшими) молекулами.

Намного более обещающим казалось использование экзонуклеазы для медленного пошагового гидролиза (расщепления) единичной молекулы ДНК. Исследователям довольно легко удалось научиться помещать в реактор одну молекулу ДНК и контролировать скорость реакции. Но вот разработать способ достоверной идентификации полученных единичных нуклеотидов, к сожалению, так и не удалось.

Однако практика настоятельно требовала дальнейшего удешевления секвенирования с учетом уже отработанной полной автоматизации самой реакции Сэнгера. И устав ждать «журавля в небе» от создателей принципиально новых подходов, независимые группы исследователей и ведущие фирмы-разработчики взяли за автоматизацию этапа трудоемкой подготовки к классическому секвенированию, а именно – автоматизацию процесса расчленения одной длинной молекулы ДНК на много мелких фрагментов заданной длины.

Стоимость проекта расшифровки первого генома человека оказалась сравнима со стоимостью проекта высадки на Луну

Поскольку при таком подходе фрагменты нарезаются случайным образом, то для достоверного чтения длинных последовательностей их требуется значительно больше, чем при направленном фрагментировании ДНК. Поэтому требовалось автоматизировать разделение этих фрагментов в пространстве и последующую регистрацию нескольких миллионов реакций секвенирования, происходящих одновременно. Так появилось новое поколение приборов для определения нуклеотидных последовательностей, получившее название «системы массового параллельного секвенирования».

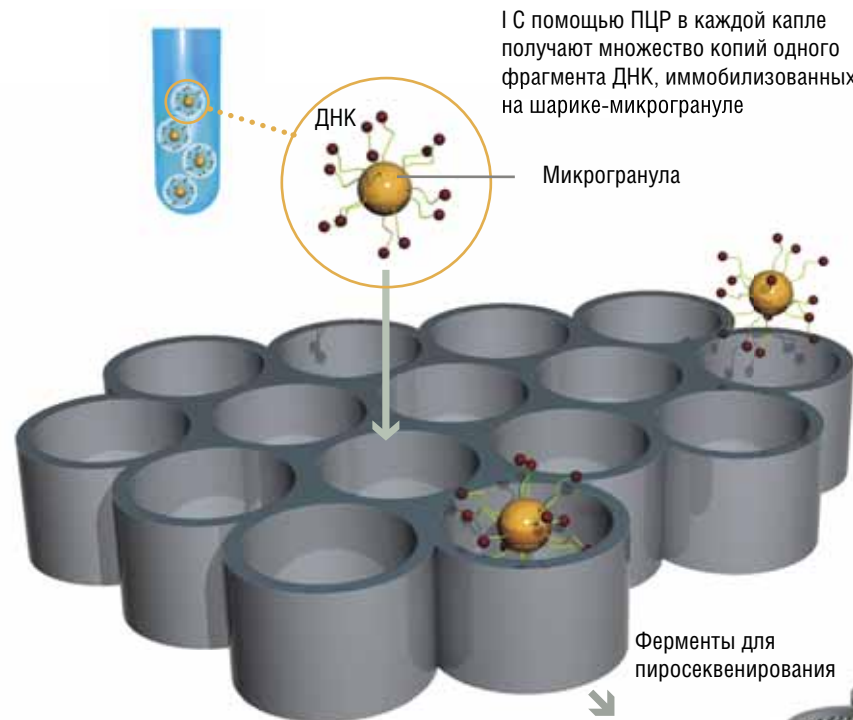
Разделяй и секвенируй

Группа разработчиков, финансируемая Национальными институтами здравоохранения США (проект *Life Science 454*), предложила для разделения фрагментов использовать микрогранулы, взвешенные в отдельных каплях водно-масляной эмульсии. При этом микрогранулы должны быть изолированы друг от друга и содержать не более одной молекулы фрагмента исходной ДНК. После *амплификации*, т. е. создания внутри гранулы «колонии» из огромного числа точных копий исходного фрагмента с помощью *полимеразной цепной реакции* (ПЦР*), можно приступить к самому секвенированию.

На этом этапе гранулы помещают в специальный планшет, в каждой ячейке которого есть место только для одной гранулы. Для визуализации каждого шага реакции секвенирования используется давно известное *пиросеквенирование* – метод, в котором при подаче в ячейку «правильного» нуклеотидтрифосфата, который включается в растущую цепь ДНК, испускается свет. Изображение планшета постоянно записывается, так что на каждой стадии можно регистрировать свет, испускаемый отдельными ячейками.

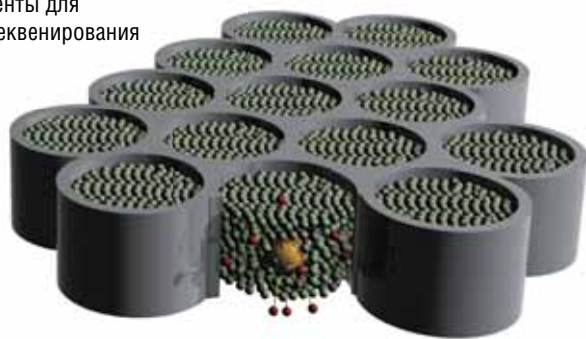
После того как прототип такого прибора доказал свою работоспособность, разработку купил концерн *Roche*, который и занимается коммерческим распространением прибора.

* ПЦР – метод, позволяющий производить в неограниченных количествах копии одной молекулы нуклеиновой кислоты с помощью специальных ферментов. Метод базируется на способности нуклеиновых кислот к комплексному взаимодействию

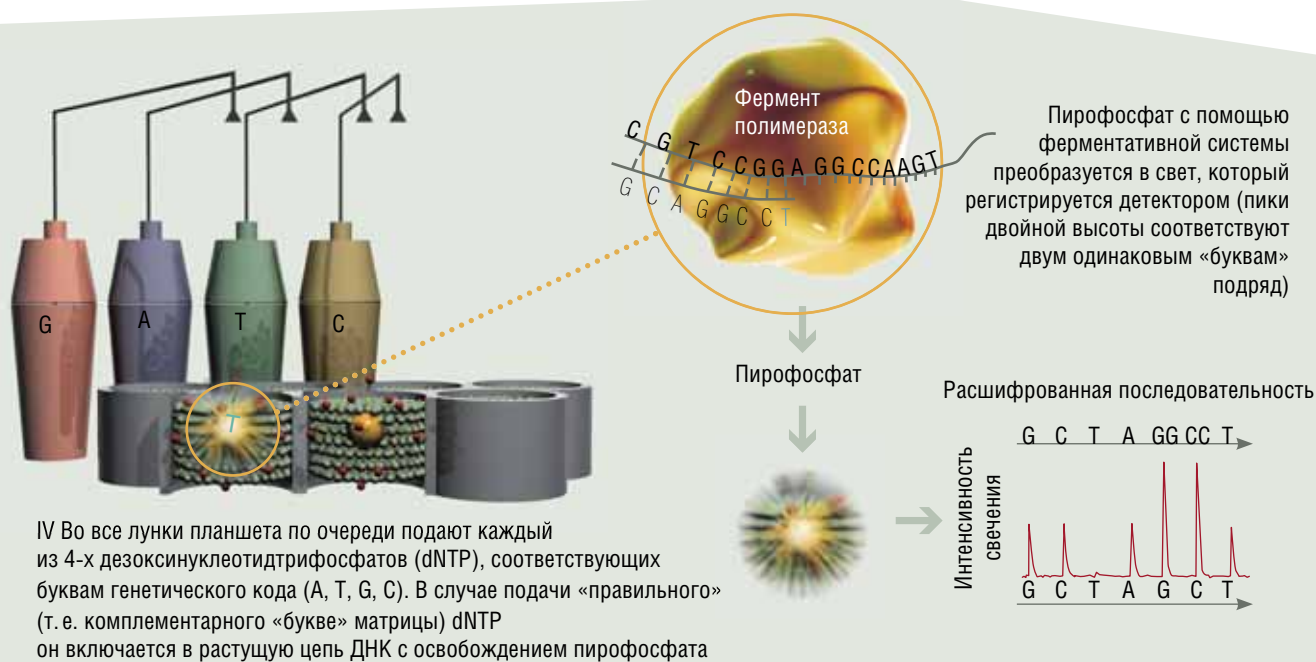


II Микрогранулы с ДНК переносятся в планшет, каждая – в индивидуальную ячейку

III В планшет добавляют ферменты для пиросеквенирования, также иммобилизованные на шариках



В секвенаторе «Life Science 454» для разделения фрагментов ДНК используют микрогранулы, взвешенные в отдельных каплях водно-масляной эмульсии. После создания «колонии» из огромного числа точных копий исходного фрагмента приступают к самому секвенированию. Для визуализации каждого шага реакции секвенирования используется «пиросеквенирование». При этом при включении в растущую цепь ДНК новой «буквы» (нуклеотидтрифосфата) – испускается свет. По полученной пирограмме можно прочитать последовательность ДНК



Ааііі çäääöîî ?

Научные лаборатории и биотехнологические компании продолжают активно соревноваться друг с другом в стремлении первыми предоставить «дешевые геномы», и ставки в этом соревновании весьма высоки.

Так, в сентябре 2003 г. научный фонд К. Вентера посулил полмиллиона долларов тому, кто первым прочтет геном человека за одну тысячу долларов. В 2004 г. национальные институты здравоохранения США запустили программу, предусматривающую 70 грантов (каждый – по миллиону долларов) для поддержки исследований по снижению стоимости расшифровки больших геномов до 100 тыс. долл. и менее. А еще через два года фонд Вентера и «X Prize Foundation» объявили о премии в 10 млн долл. исследователям, которые сумеют расшифровать 100 человеческих геномов за 10 дней по цене не более 10 тыс. долл. за геном.

Пока обещанные призовые не получил никто: на практике расшифровка индивидуальных геномов обходится намного дороже. Так, год назад на торжественной церемонии в Хьюстоне Джеймсу Уотсону, одному из легендарных открывателей структуры ДНК, были вручены два DVD с записью его генома. По признанию дарителей, эта работа хотя и была сделана относительно быстро – всего за два месяца, но оказалась весьма затратной: стоимость одних лишь использованных реактивов составила около миллиона долларов!

Что же означают рекламные призывы на сайтах некоторых биотехнологических компаний – «Секвенируем ваш геном! Недорого!»? Может быть, они знаменуют собой начало новой эры – эры секвенирования индивидуальных геномов, перехода генетики с уровня видов и популяций на уровень индивидуумов? Смогут ли ученые достичь заданной ценовой планки за расшифровку полного человеческого генома, и если да, то с помощью каких методов?

Скорее всего, это будут все же не столь популярные сегодня приборы массового параллельного секвенирования. Эволюция снова делает виток, и очередными «generation next» станут устройства, работающие с единичными молекулами нуклеиновых кислот. Но это уже тема для будущей статьи.

Lumeramya

Bentley D.R. et al. Accurate whole human genome sequencing using reversible terminator chemistry. // Nature. – 2008. – V. 456(6). – P. 53–59.

Wang J. et al. The diploid genome sequence of an Asian individual. // Nature. – 2008. – V. 456(6). – P. 60–66.

Фото из архива ЦКП «Секвенирование ДНК» СО РАН (Новосибирск)

Другой подход к решению проблемы разделения в пространстве «молекулярных колоний» предложен в рамках проекта SOLEXA. В этом случае раствор фрагментов исходной ДНК наносится на подложку, к которой прочными ковалентными связями присоединены олигонуклеотиды – «затравки» для последующего проведения ПЦР. Раствор ДНК разбавляется настолько, чтобы между отдельными молекулами имелось достаточное расстояние. Копии одного фрагмента (молекулярная колония) остаются в той же области, где находился исходный фрагмент, поскольку при их синтезе используются находящиеся рядом на поверхности подложки олигонуклеотиды.

После демонстрации практических успехов этого подхода разработку приобрела и успешно распространяет биотехнологическая компания Illumina. Аналогичная разработка SOLiD, находящаяся сейчас на стадии коммерческого внедрения, имеется и у монополиста на рынке традиционного секвенирования – фирмы ABI.

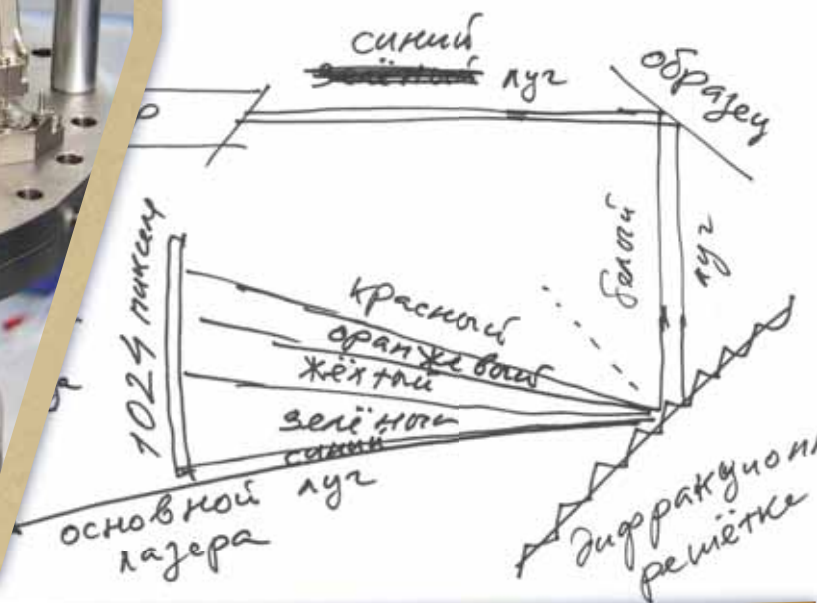
В результате создания подобных технологий расшифровка нуклеотидной последовательности единичного фрагмента исходной ДНК теперь стоит совсем дешево и не требует ручного труда. Правда, пока длина расшифрованных фрагментов невелика – около 400 нуклеотидных остатков для Life Science 454, и лишь несколько десятков – для SOLEXA и SOLiD. Но зато таких фрагментов может быть очень много...

К сожалению, первые итоги практического использования этих приборов показали, что надежды, которые с ними связывали, оправдались далеко не в полной мере. Некоторые успехи были продемонстрированы лишь при дешифровке относительно простых геномов бактерий. Что касается крупных геномов высших организмов, включая человека, то некоторые их участки совсем или почти не представлены среди расшифрованных последовательностей. При этом небольшая длина фрагментов делает сборку из них протяженных последовательностей задачей крайне сложной и принципиально неоднозначной.

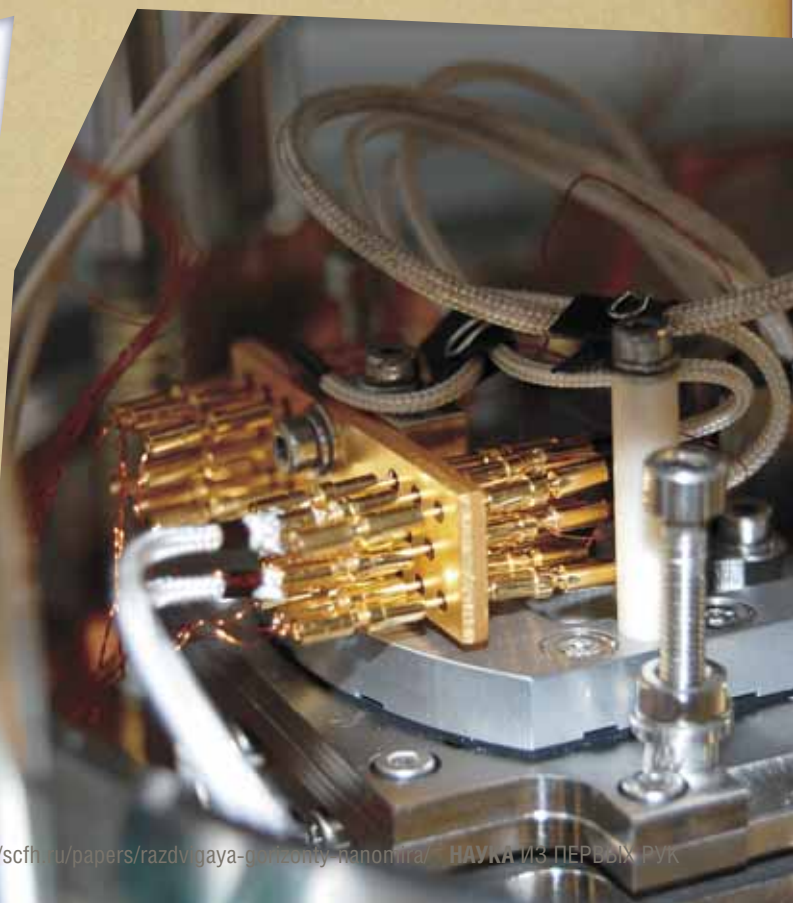
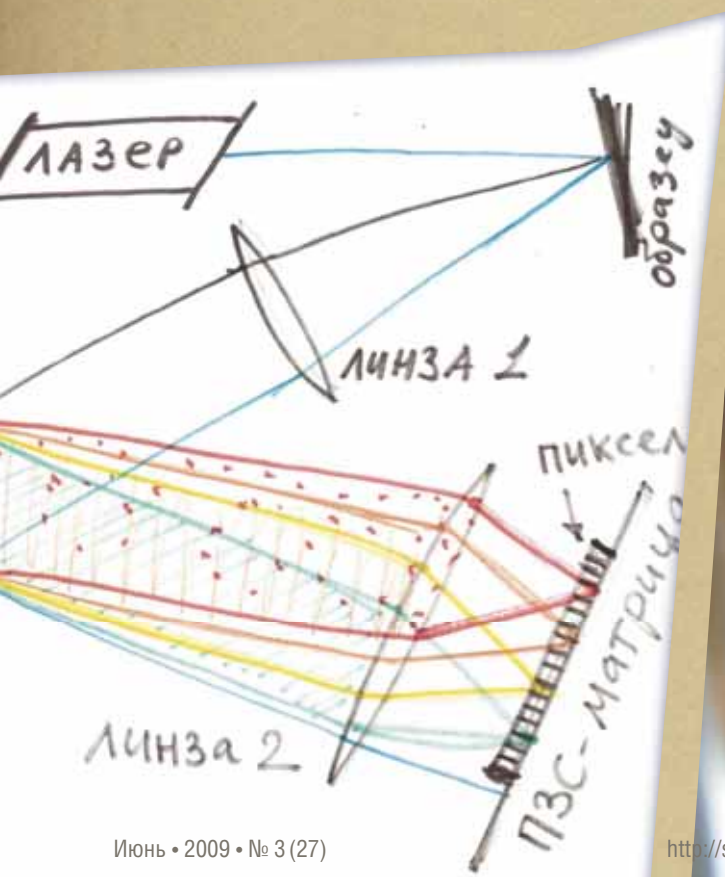
Тем не менее эти технологии позволили практически в неограниченных масштабах проводить повторное секвенирование и сравнительный анализ геномов разных особей с тем, чтобы, к примеру, выявить индивидуальные различия, что очень важно для медицинских целей. Чтение же больших геномов de novo (т.е. «с чистого листа») пока по-прежнему не может обойтись без работы огромных «фабрик по секвенированию».



А. В. АРЖАННИКОВ, А. А. ШКЛЯЕВ, В. А. ВОЛОДИН



РАЗДВИГАЯ ГОРИЗОНТЫ НАНОМИРА



АРЖАННИКОВ Андрей Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск), декан физфака НГУ, директор НОК НСМ. Область научных интересов: релятивистские электронные пучки, физика плазмы, взаимодействие частиц и излучения с веществом. Автор и соавтор более 200 научных работ, в том числе 2 монографий



ШКЛЯЕВ Александр Андреевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (Новосибирск). Область научных интересов: физико-химические процессы на поверхности кремния, излучение света материалами на основе кремния. Автор и соавтор около 70 научных работ и 4 патентов



ВОЛОДИН Владимир Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (Новосибирск). Область научных интересов: полупроводники, наноструктуры, оптические методы исследований наноструктур. Автор и соавтор около 100 научных работ, в том числе 1 монографии, и 1 патента

Год назад в Новосибирском государственном университете был открыт Научно-образовательный комплекс «Наносистемы и современные материалы» (НОК НСМ). Сегодня ведущие специалисты комплекса рассказывают о двух важных направлениях исследований, которые успешно развиваются в рамках новой научно-учебной структуры

Термин «нанотехнологии» стал в последнее время настолько расхожим, что смысл его слегка размыт. Хочется уточнить, что понятие «нано» по-настоящему употребимо при рассмотрении объектов, которые содержат сравнительно небольшое число атомов, связанных между собой в твердое вещество. С изменением расположения атомов и размеров занимаемой ими области физические и химические свойства твердого тела изменяются. Характерный пространственный масштаб, за пределами которого принципиальных изменений этих свойств уже не происходит, составляет сотню нанометров, и поэтому термин «нано» следует применять для объектов меньших размеров.

Природа вещей такова, что внутри твердого тела и вблизи его поверхности свойства материи сильно отличаются. Это фундаментальное обстоятельство нашло отражение и в выборе широкого спектра приборов, которыми оснащены диагностические лаборатории Научно-образовательного комплекса НГУ. В приборном парке НОК НСМ есть сканирующий и просвечивающие электронные микроскопы, малоугловой рентгеновский дифрактометр, набор лазерных эллипсометров и другое уникальное оборудование, которое представляет большой интерес для физиков, химиков, биологов, медиков, геологов.



Туннельный микроскоп высокого разрешения SMT VT (Omicron) позволяет различать отдельные атомы на поверхности твердого тела

Дефекты во благо

Вездесущий кремний является материалом, из которого изготавливаются все основные элементы оптоэлектроники. Исключение составляют источники света – светодиоды и лазеры, которые обычно делают из других полупроводниковых материалов, например из нитрида галлия.

Если бы было возможно создавать источники света на основе кремния, это открыло бы широкие перспективы для конструирования монолитных оптоэлектронных устройств, все элементы которых располагаются на одной пластине. Этому, однако, препятствует строение электронной системы кристаллического кремния.

Дело в том, что в кристаллической решетке кремния излучательные переходы электронов через *запрещенную зону* могут происходить только при одновременном возбуждении *фонона*,

Мы сосредоточим внимание лишь на двух методах исследования структуры и свойств твердого тела: сканирующей туннельной микроскопии, которая регистрирует моноатомный поверхностный слой, и спектроскопии света, претерпевшего комбинационное рассеяние на электронах атомов в тонком поверхностном слое. Оба метода, кстати говоря, в свое время были отмечены Нобелевскими премиями: в 1930 г. высшую награду по физике получил один из первооткрывателей эффекта комбинационного рассеяния света, а изобретатели сканирующего туннельного микроскопа – прибора, который резко раздвинул инструментальные горизонты научного познания, – были удостоены премии в 1986 г.

Изложенные в статье результаты исследований этими классическими методами дают представление о некоторых особенностях наноразмерного мира.



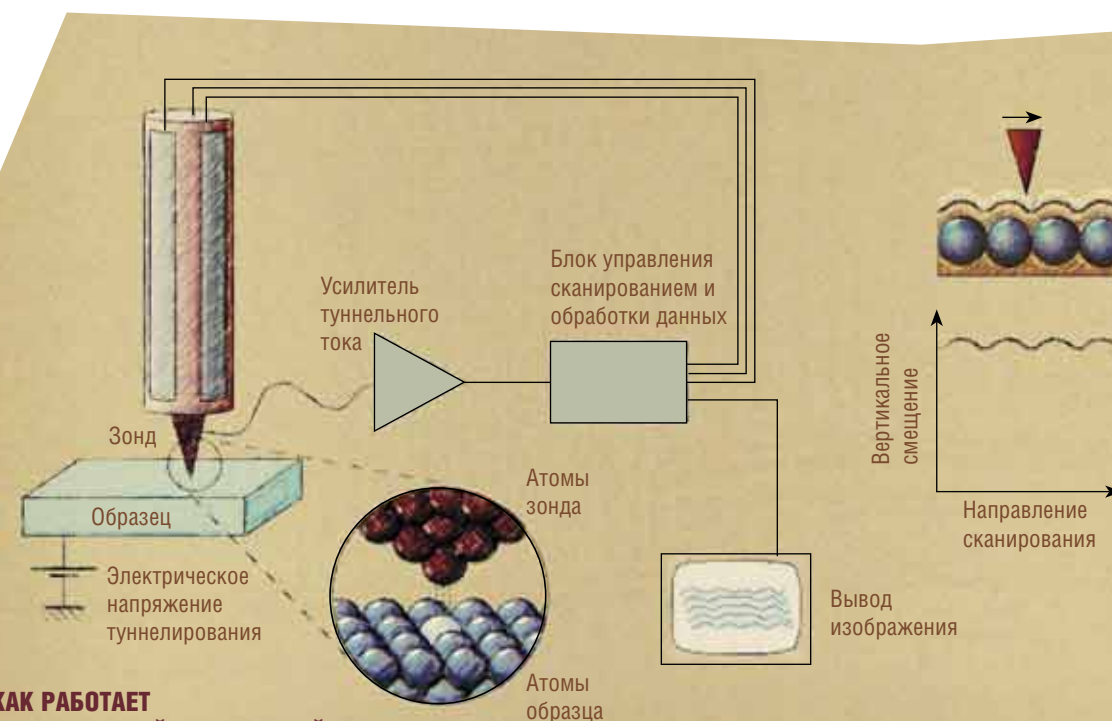
Схема зонной структуры кремния (в координатах энергия – волновой вектор). Стрелками показаны захват электрона из *зоны проводимости* (E_c) на уровень, созданный кристаллическим дефектом (E_d), и последующий оптический переход в *валентную зону* (E_v)

то есть в том случае, когда некоторая часть энергии переходит в энергию колебаний решетки. Вероятность такого процесса крайне мала. Но если в запрещенной зоне создать дополнительные энергетические уровни, на которые электроны могут быть временно захвачены, то возбуждение фонона может не потребоваться. Излучательные переходы из промежуточных уровней могут происходить более эффективно, чем межзонные переходы, а длина волны излучаемого света будет зависеть от положения уровня.

В настоящее время наиболее востребованы источники излучения с длиной волны около 1,5 мкм, которая близка к оптимальной для использования в оптоволоконных средствах связи. Давно известно, что соответствующие

этим длинам волн энергетические уровни возникают в кремнии, содержащем дефекты в кристаллической структуре. Такими дефектами могут быть, например, *межузельные атомы*, расположенные между узлами решетки. Поскольку интенсивность излучения прямо пропорциональна числу дополнительных уровней, т. е. числу дефектов, то усилия исследователей направлены на поиск и развитие методов выращивания кремния с такими специально созданными дефектами.

В Новосибирском государственном университете совместно с Институтом физики полупроводников СО РАН и Токийским университетом разрабатывается оригинальный метод роста слоев кремния, приводящий к образованию массивов кристаллических дефектов нужного типа.

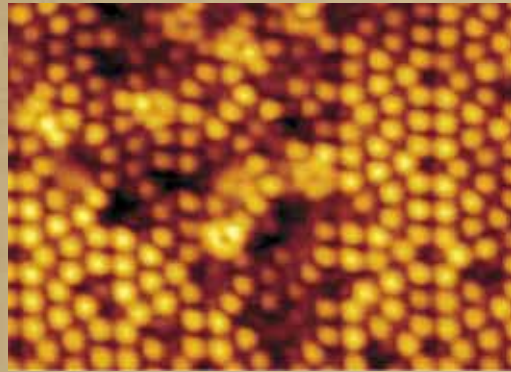


КАК РАБОТАЕТ СКАНИРУЮЩИЙ ТУННЕЛЬНЫЙ МИКРОСКОП

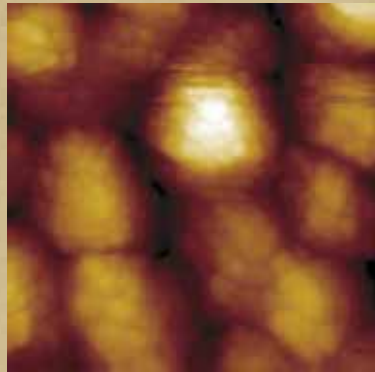
Метод сканирующей туннельной микроскопии изобретен Г. Биннигом и Г. Рорером в 1983 г. В его основе лежит эффект, суть которого в том, что количество электронов, переносимое из одного материала в другой через малый зазор при заданном электрическом напряжении между материалами, экспоненциально уменьшается с увеличением ширины зазора. Этот ток электронов называется *туннельным током*. Экспоненциально резкая зависимость приводит к тому, что перенос электронов происходит только в том месте, где атом одного материала расположен наиболее близко к атому другого.

Если изготовить зонд в виде острия (например, из вольфрама), которое оканчивается одиночно выступающим атомом, и приблизить это острие к поверхности тела, то область, через которую туннелируют электроны,

будет иметь размер, сравнимый с атомным. Чтобы получить компьютерное изображение исследуемой поверхности, обычно применяют электрическую схему с *обратной связью*, устроенной таким образом, что при сканировании зондом вдоль поверхности величина туннельного тока поддерживается постоянной. Это приводит к сохранению постоянного расстояния между острием зонда и образцом. В результате сканирование вдоль горизонтальной поверхности сопровождается вертикальными смещениями зонда при прохождении им выступающих поверхностных атомов, атомных ступеней, островков и других особенностей морфологии. Эти вертикальные смещения регистрируются и формируют изображение (карту высот) на экране монитора.



а 3 нм



б 5 нм

Эта похожая на кукурузу мозаика на самом деле представляет собой виды поверхностей полупроводника с изображением отдельных атомов, полученные на сканирующем туннельном микроскопе: а – чистая поверхность кремния с кристаллографической ориентацией (111); б – массив полусферических островков кремния на оксидированной поверхности.
Фото А. Шкляева

Метод основан на использовании *сканирующей туннельной микроскопии* (СТМ).

Научно-образовательный комплекс НГУ обладает новым сверхвысоковакуумным прибором фирмы *Omicron*, который позволяет получать данные о структуре и морфологии поверхности растущего слоя с пространственным разрешением на атомном уровне. На изображениях, получаемых с его помощью, хорошо различимы отдельные атомы, которые выглядят как круглые шарики.

Вообще говоря, прибор СТМ можно использовать не только для диагностических целей, но и для выполнения технологических операций в условиях высокого вакуума. Для решения таких задач в вакуумную камеру прибора фирмы *Omicron* установлен источник атомов кремния для осаждения на поверхность образца и устройство для напуска кислорода. В ходе технологического эксперимента оказалось, что рост кремния на оксидированной поверхности кремния начинается

с зарождения полусферических островков, имеющих очень высокую плотность массива – около 10^{13} на квадратный сантиметр. При такой плотности островки могут достигать диаметра 3 нм, после чего происходит их *коалесценция*, т.е. срастание. При коалесценции островков возникают кристаллические дефекты определенного типа, которые создают глубокие уровни в запрещенной зоне и служат центрами излучения света с длиной волны 1,5–1,6 мкм.

Туннельный микроскоп позволяет контролировать и исследовать процессы зарождения, роста и коалесценции наноструктур кремния непосредственно в ростовой камере. На данной установке СТМ можно использовать образцы только относительно небольшого размера, что порой затрудняло исследование кремния другими методами. В таких случаях слои большой площади выращивались в другой ростовой камере.

Полученные слои кремния были с успехом применены для изготовления светодиодов, в которых

Спектр излучения светодиода, изготовленного на основе слоев кремния с массивами кристаллических дефектов (спектр снят при комнатной температуре)



Спектрометр T64000 (Horiba Jobin Yvon) задействован не только в научном, но и в образовательном процессе: в этом году с его применением в НГУ подготовлено пять курсовых и три дипломных работы

электрическая энергия эффективно преобразуется в излучение в диапазоне 1,4–1,6 мкм. Подчеркнем особую привлекательность этих длин волн – сам кремний для них прозрачен.

Таким образом, предварительные результаты исследований показывают, что слои кремния с массивами дефектов перспективны для конструирования источников света в столь важной для приложений инфракрасной области спектра.

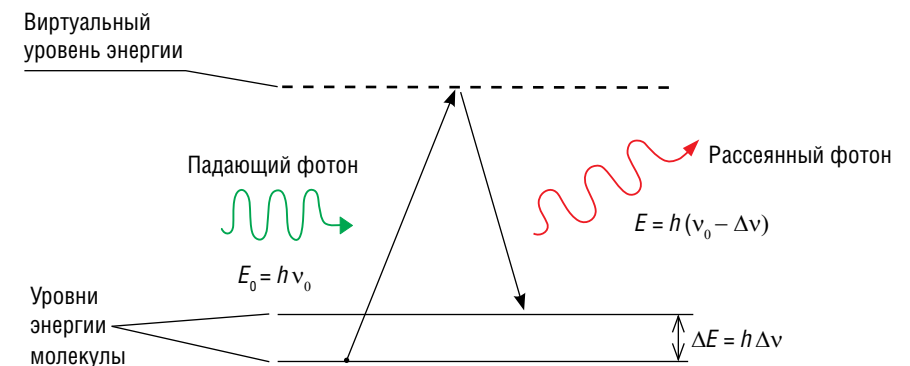
Вот такой рассеянный... фотон

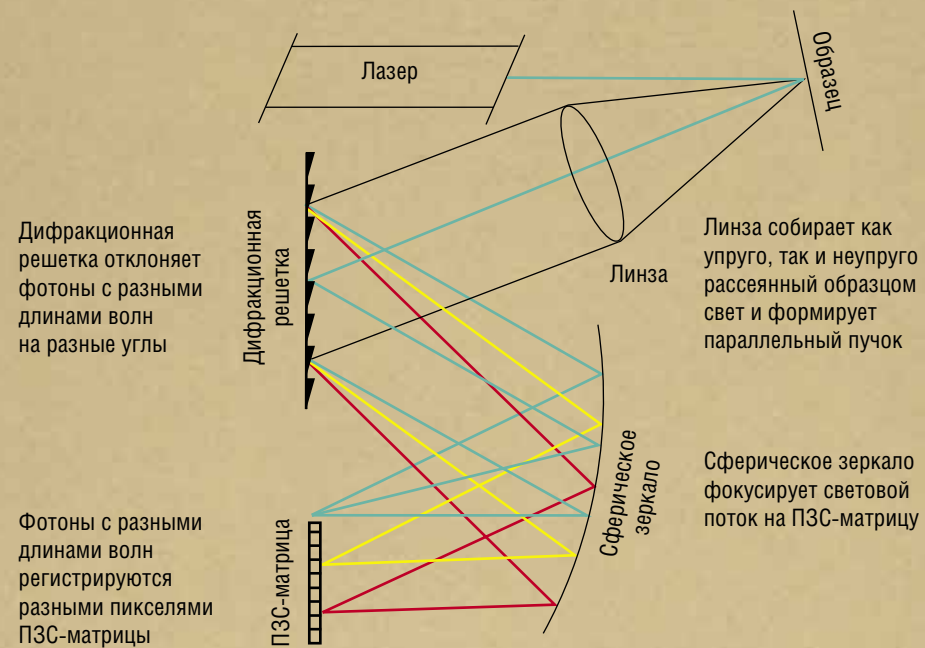
Среди уникального оборудования, которым оснащен Научно-образовательный комплекс НГУ «Наносистемы и современные материалы», имеется спектрометр комбинационного рассеяния света фирмы *Horiba Jobin Yvon*. Прибор имеет рекордные характеристики в сво-

ем классе; в России всего четыре подобных аппарата. Но прежде чем говорить о научных задачах, которые решаются в НОКе с помощью этого прибора, поясним некоторые физические принципы, заложенные в его устройство.

Эффект *комбинационного рассеяния света* (КРС) был открыт в 1928 г. независимо советскими физиками Г.С. Ландсбергом и Л.И. Мандельштамом и индийскими – Ч. Раманом и К. Кришнаном (в англоязычной литературе явление носит название эффекта Рамана). Комбинационное рассеяние – это неупругое рассеяние света в веществе, в результате которого частота

Комбинационное рассеяние света на молекуле. В качестве примера показан *стоксов процесс* – с уменьшением частоты (*антистоксов процесс* происходит с увеличением частоты)





Принципиальная схема спектрометра КРС. Рассеянный образцом лазерный свет в результате прохождения нескольких оптических элементов регистрируется ПЗС-матрицей. Обратите внимание, что прямое попадание лазерного излучения (зеленые лучи) на матрицу недопустимо, ведь оно на много порядков интенсивнее сигнала комбинационного рассеяния

фотона (квант электромагнитного поля) изменяется. Она становится равна либо разности, либо сумме частот изначального фотона и собственных колебаний в веществе (к примеру, колебаний атомов в молекуле). Как известно, энергия кванта пропорциональна частоте: $E = h\nu$, поэтому упомянутая закономерность изменения частоты есть прямое следствие закона сохранения энергии.

Первооткрыватели эффекта изучали рассеяние света на *фононах* (квант механических колебаний) в кристалле кварца (Ландсберг, Мандельштам) и на колебательных модах молекул воды (Раман, Кришнан). Что совершенно необходимо для исследования КРС – это источник света, оптическая система, способная разложить свет в спектр, и приемник. В качестве этих трех составляющих Раман и Кришнан использовали Солнце, стеклянные фильтры, человеческий глаз, а Ландсберг и Мандельштам – ртутную лампу, дифракционную решетку, фотобумагу.

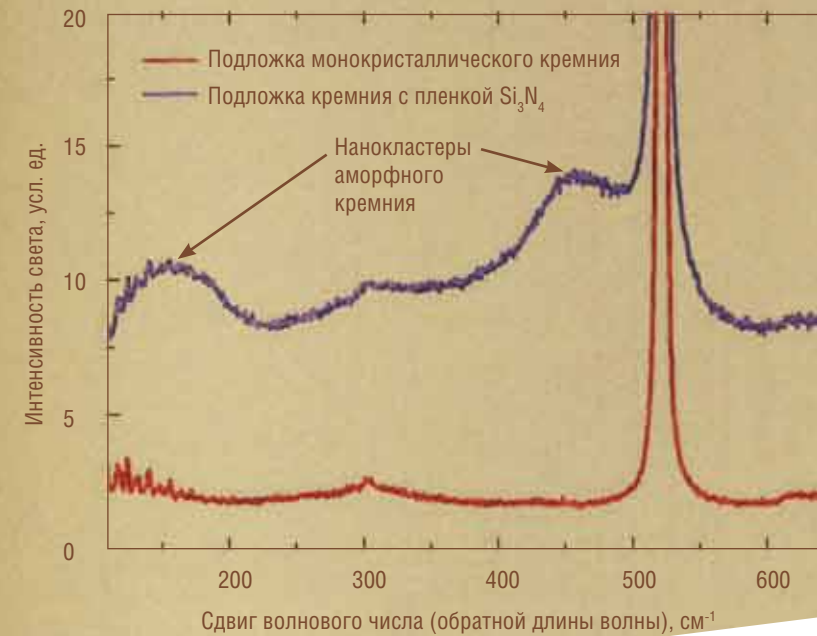
С появлением мощных монохроматических источников света (лазеры) и чувствительных светоприемников, способных зарегистрировать отдельные фотоны (фотозлектронные умножители и матрицы ПЗС), а также в результате совершенствования оптических схем комбинационное рассеяние света превратилось из интересного физического эффекта в мощную методику исследования вещества. Поскольку спектр КРС отражает колебательный спектр вещества, из его анализа

можно извлечь информацию о химическом и фазовом составе образца, размерах кластеров, механических напряжениях и т. д.

Как устроен современный спектрометр КРС? Сердце спектрометра – монохроматор, оснащенный одной, двумя или тремя дифракционными решетками. Фотоны с разной частотой дифракционная решетка отклоняет на разные углы – и по этой причине они попадают в разные точки (пиксели) регистрирующей ПЗС-матрицы. Для улучшения разрешающей способности прибора и подавления нежелательного фона от мощной лазерной линии, которой возбуждается сам процесс комбинационного рассеяния, используют несколько дифракционных решеток. Спектром комбинационного рассеяния вещества, который в итоге измеряется, принято называть зависимость интенсивности света от разности частот рассеянного и падающего фотона. Таким образом, частота падающего фотона берется за нулевую точку отсчета.

В качестве наиболее яркого научного результата, полученного в НОКе за то сравнительно непродолжительное время, что эксплуатируется спектрометр КРС, отметим обнаружение *анизотропии дисперсии* (т.е. зависимости скорости от направления) *фонон-плазмонных мод* в легированных сверхрешетках.

Здесь необходимо пояснить, что плазмон – это квант коллективных колебаний свободных электронов в кристаллической решетке материала. Частота



Пример спектров комбинационного рассеяния света. Стрелками показан вклад в сигнал от нанокластеров аморфного кремния, обнаруженных в пленке Si_3N_4 . Исторически сложилось, что сдвиг частоты рассеянных фотонов приводят не в герцах, а в обратных сантиметрах: чтобы перевести в герцы, надо домножить на скорость света

этих колебаний сильно зависит от концентрации свободных зарядов. Если частота плазмона сравнима с частотой фонона (т.е. механических колебаний решетки, в узлах которой расположены ионы), они взаимодействуют между собой с образованием новой квазичастицы – фонон-плазмонного колебания.

Сверхрешетка – рукотворный нанообъект, который содержит периодические слои из двух материалов (например, арсенида галлия и арсенида алюминия). Обычно сверхрешетки изготавливаются с применением методов молекулярно-лучевой эпитаксии. Толщины слоев контролируются с атомарной точностью. Лидером в некоторых разделах этой технологии является Институт физики полупроводников СО РАН.

Применение микроприставки, которой укомплектован спектрометр, дало возможность изучать фононы и фонон-плазмонные моды, распространяющиеся не только поперек слоев сверхрешетки, но и вдоль. Для этого излучение лазера было сфокусировано на «торец» сверхрешетки толщиной в доли микрона!

Еще одна актуальная работа – по пленкам с большой диэлектрической проницаемостью – ведется совместно с Институтом неорганической химии СО РАН. Высокая чувствительность прибора позволила обнаружить нанокластеры углерода в пленках, признанных одним из ключевых материалов наноэлектроники. А в пленках нитрида кремния, по стехиометрическому составу очень близких к Si_3N_4 , были обнаружены нанокластеры аморфного кремния.

Методика спектроскопии комбинационного рассеяния света помогает развивать не только науку, но

и технологию. Анализ спектров позволяет очень быстро определять фазовый состав пленок и нанокластеров кремния, не разрушая их. Например, в пленках, подвергнутых наносекундным и фемтосекундным лазерным обработкам, зарегистрирован эффект кристаллизации аморфных нанокластеров кремния. Это позволит продвинуть технологию низкотемпературной кристаллизации аморфных материалов. Заявка на получение патента уже отправлена.

Добавим в заключение, что НОК НСМ – открытая система, и тот же спектрометр комбинационного рассеяния, который был запущен в эксплуатацию в прошлом году, используется под научные задачи не только физиков, но и химиков, биологов и геологов. Участвует прибор и в образовательном процессе: в этом году с его применением в НГУ подготовлено пять курсовых работ, два бакалаврских диплома и магистерская диссертация.

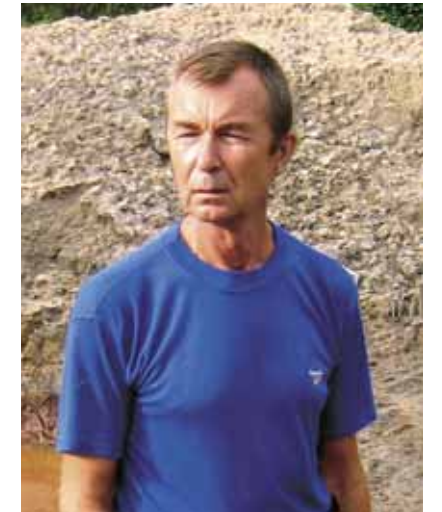
Литература

Володин В.А. // Письма в ЖЭТФ. – 2009. – Т. 89. – С. 483.
 Фабелинский И.Л. // УФН. – 2003. – Т. 173. – С. 1137.
 Шкляев А.А., Ичикава М. // УФН. – 2006. – Т. 176. – С. 913.
 Шкляев А.А., Ичикава М. // УФН. – 2008. – Т. 178. – С. 139.

В. П. АФАНАСЬЕВ

РОДОСЛОВНАЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Несмотря на успехи в синтезе искусственных драгоценных камней, в том числе и алмазов, спрос на природные камни не падает. Кристаллы, рожденные миллионы лет назад в земных глубинах, становятся гордостью музеев и частных коллекций, их используют в качестве банковских активов... И самое главное, как и в древности, алмазы остаются самым желанным и дорогим женским украшением. Но современные «охотники за сокровищами» надеются не только на удачу: они стремятся проникнуть в самую тайну происхождения кристаллического углерода, чтобы получить в руки надежную путеводную нить в своих нелегких поисках



Многие вещи нам непонятны не потому, что наши понятия слабы, но потому, что сии вещи не входят в круг наших понятий.

Козьма Прутков

АФАНАСЬЕВ Валентин Петрович – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор более 150 научных работ, в том числе 6 монографий. Заядлый путешественник

Однажды мой учитель Збигнев Бартошинский, профессор кафедры минералогии Львовского университета, сказал с оттенком раздражения: «Скоро алмазы дома за печкой находить будут». Речь шла об открытии в 1980 г. в Северном Казахстане месторождения Кумды-Коль, где алмазы содержались в породе, образовавшейся невулканическим путем. Это стало очередным ударом по устоявшимся представлениям, что единственным источником природных алмазов является *кимберлит* – магматическая порода.

Геология алмаза до этого времени напоминала классическую физику XIX в., когда большинство наблюдаемых явлений могло быть с успехом объяснено в рамках одной действующей парадигмы. Однако знаменитый опыт Майкельсона–Морли, показавший независимость скорости света от скорости движения его источника, открыл для физики совершенно новые горизонты.

Нечто похожее произошло и с теорией о происхождении алмазов, хотя здесь до сих пор еще срабатывает один из психологических аспектов познания – консерватизм мышления. «Не ищите избыточных сущностей» – этот принцип средневекового схоласта, названный позднее «бривой Оккама», исподтишка заставляет нас сунуть ноги в мягкие стоптанные тапочки у дивана, чтобы не идти босиком по каменной дороге.

Тем не менее открытия новых месторождений низвели кимберлит к уровню одного из многих источников алмазов, общее число которых до сих пор неизвестно. Геологи, пусть и со скрипом, но начинают признавать новую реальность: алмазы *полигенны*, т. е. имеют раз-

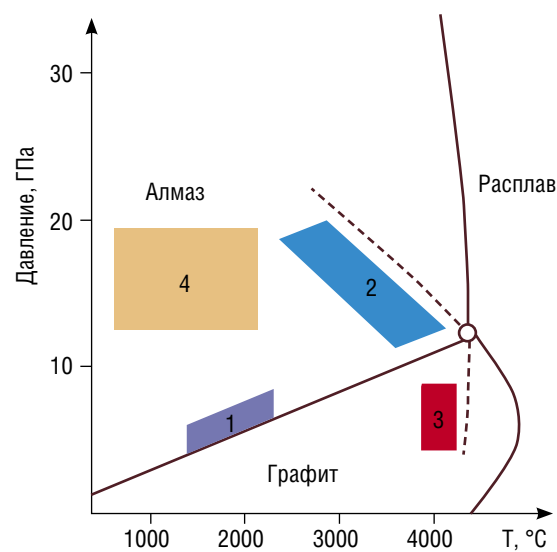
личное происхождение. Сегодня мы знаем о полигенезе алмазов немало, но это знание пока не систематизировано, поэтому оперировать им приходится главным образом на уровне фактов.

Для начала вспомним, что в природе алмазы образуются при высоком давлении и температуре (более 45 кбар и 1200 °С). Такие условия встречаются на глубинах 120 км и более в верхней мантии Земли. (Сейчас обнаружены сверхглубинные алмазы, кристаллизовавшиеся на глубинах до 600 км, соответствующих нижней мантии.)

Нужно отметить, что ни в одном коренном или россыпном месторождении мы не найдем двух одинаковых кристаллов. Они не могут быть тождественны полностью хотя бы по тому, что в один и тот же момент времени не могли занимать одно и то же место в пространстве. Их неравнозначность – неизбежное следствие локальных и временных колебаний условий кристаллизации и ряда других факторов.

Понятно, что полигенез алмазов – понятие очень широкое, и рассмотреть его в полном объеме практически невозможно. Поэтому представляется наиболее целесообразным сначала разделить все сообщество природных алмазов по заранее оговоренному признаку и изучать полигенез внутри выделенных групп. Ведь совокупность алмазов, однородная в отношении одного признака, может быть очень разнообразной в отношении других.

В качестве аналогии рассмотрим человечество как сумму отдельных индивидов: его можно разбить на моногенные группы по полу, расе, национальности,



Алмазы, как видно из фазовой диаграммы элементарного углерода, образуются при высокой температуре и давлении:

- 1 – область каталитического (в присутствии металла) синтеза алмаза из графита;
- 2 – область прямого перехода графита в алмаз;
- 3 – область прямого превращения алмаза в графит;
- 4 – область прямого превращения графита в лонсдейлит (алмазную фракцию, образующуюся в результате ударных высокоскоростных взаимодействий). По: (Bundy, 1989)

религиозной принадлежности и т. д. Так и алмазы можно делить на определенные группы по условиям кристаллизации, составу материнской среды, источнику углерода.

При этом признаком, наиболее полно отражающим изначальную полигенность алмазов, является, очевидно, тип коренного источника.

Хранятся в россыпях

Полигенез алмазов по типам коренных источников наиболее наглядно можно наблюдать при исследовании *россыпей* – скоплений относительно мелких обломков массивных горных пород, разрушившихся под действием изменений температуры, воды, ветра. Минералы, устойчивые к механическому износу и физико-химическим воздействиям, могут сохраняться в россыпях миллионы лет, даже неоднократно переотлагаясь в более молодые отложения.

Алмаз в этом отношении уникален – это настоящий Агасфер в мире минералов благодаря своей твердости

ПО СЛЕДУ КОРЕННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Коренное алмазное месторождение значительно перспективнее для эксплуатации, нежели россыпное. Поэтому, обнаружив россыпь, геологи сразу пытаются определить тип и местоположение коренного источника. И в этом смысле старателю, не обремененному научным багажом, проще: его метод – это метод «тыка», или «дикуй кошки», т. е. тотальный поиск на местности в расчете натолкнуться на коренное месторождение или богатый участок россыпи.

Уважающий же себя геолог попытается дать научно обоснованный прогноз, опираясь на накопленные знания и прецеденты. К сожалению, знаний и опыта иногда не хватает, и тогда тот же геолог, воровато озираясь, запускает «дикую кошку» под видом научного прогноза и ведет бурение, проверяя все геофизические аномалии или зондируя определенный участок в надежде попасть в месторождение. Не стоит осуждать его за это, ведь найти кимберлитовую трубку диаметром 100 м на абсолютно дикой территории в десятки тысяч квадратных километров якутской тайги либо песков Калахари, либо джунглей Гвинеи – задача очень непростая.

Тем не менее, несмотря на все трудности, геологам удалось сформировать достаточно мощный комплекс методов прогноза и поиска месторождений алмазов, главным образом кимберлитового типа, который успешно используется в самых сложных условиях. Загвоздка состоит в том, что зачастую идентифицировать найденные в россыпи кристаллы с алмазами из известных коренных источников (например, того же кимберлита) не удается, и тогда прогноз и поиск вождельного месторождения становится задачей нетривиальной.

Конечно, россыпь представляет собой «след» коренного месторождения, но ведь даже собака может взять зверя только по свежему следу. И геолог без труда выйдет на коренной источник по «дорожке» из индикаторных минералов и алмазов, если этот источник дает современный поток рассеяния, т. е. молодую россыпь. Но что делать, если россыпь древняя, как след динозавра на окаменевшей мезозойской глине?

Кроме того, подобная поисковая задача может быть не только неразрешимой, но и неактуальной. Например, поиск коренного месторождения карбонадо – специфических технических алмазов из бразильских россыпей сам по себе очень интересен для геолога, но при этом и непомерно дорог, учитывая невысокую стоимость самих кристаллов. К тому же может оказаться, что коренной источник давно разрушен процессами эрозии.



Для промывки алмазоносных отложений используют квадратные сита с мелкой сеткой, а осадок затем внимательно осматривают. На такой импровизированной обогатительной фабричке в Гвинее был найден и этот алмаз весом 2,5 карата (фото слева). На фото внизу справа – автор



АЛМАЗНЫЕ РОССЫПИ БЫВАЮТ ДВУХ ТИПОВ:

- 1) россыпи ближнего переноса с известными коренными источниками – богатыми и достаточно крупными кимберлитовыми телами; эти россыпи обычно не старше позднего палеозоя;
- 2) россыпи с неустановленными коренными месторождениями, в которых могут быть представлены алмазы из разных источников различного возраста, в том числе и кимберлита; такие россыпи могут изначально быть очень древними, но впоследствии неоднократно переотложены, вплоть до современных



Образующиеся вулканическим путем кимберлитовые тела – основной тип коренных месторождений алмазов

Ни в одном месторождении невозможно найти двух совершенно одинаковых кристаллов алмаза. Якутские алмазы – яркое тому подтверждение

и инертности к факторам внешней среды. Самая древняя из известных россыпей алмазов – Витватерсранд в Южной Африке возрастом 2,9 млрд лет. Значительно более широко распространены протерозойские (от 2,5 млрд лет) и более молодые россыпи вплоть до самых массовых современных четвертичного возраста (от 1,8–1,6 млн лет).

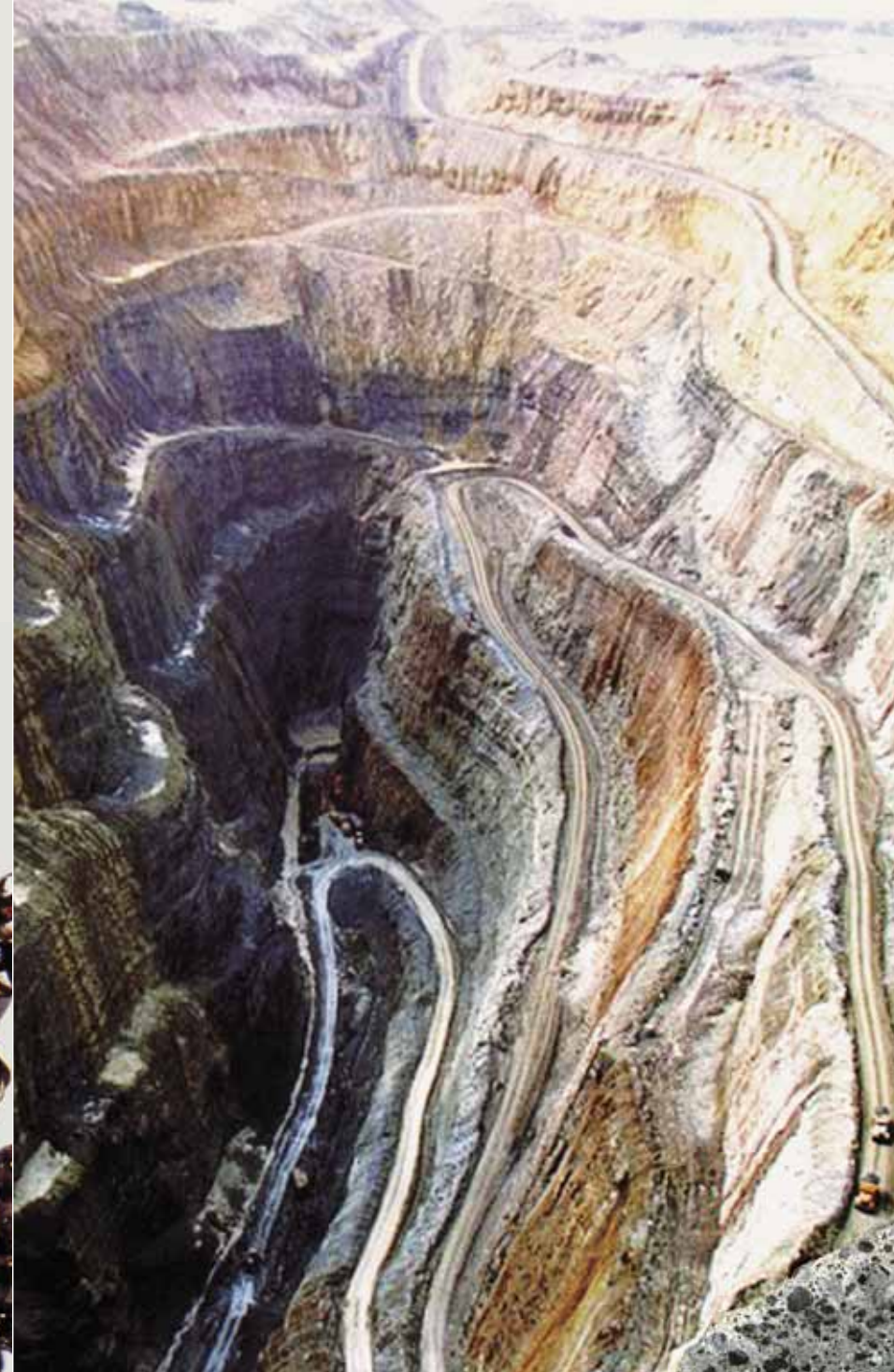
Чем моложе россыпь, тем больше шансов, что в ней содержатся алмазы из источников разного возраста и генезиса. Надо учесть также, что россыпи могут формироваться прямо над коренным источником за счет выветривания породы (*элювиальные россыпи*).

Алмазы добывались из россыпей с древнейших времен. Большинство наиболее известных «исторических» камней добыты из россыпей р. Кришна, неподалеку от индийского торгового городка Голконда. В 1725 г. на рынке появились алмазы из Бразилии, причем большинство известных ювелирных камней найдены здесь в конце XIX в. В Австралии первые алмазы обнаружены в 1861 г. в россыпях на юго-востоке континента. Добывались они и в россыпях на о. Борнео (Калимантан), на Суматре, в китайской провинции Шаньдун и ряде других мест.



Кимберлитовый транспортер

Однако настоящая история алмаза, связанная с кимберлитом как основным типом коренных месторождений, началась в 1866 г., когда пятнадцатилетний Эразмус нашел блестящий камешек на ферме своего отца близ городка Кимберли (Капская провинция в Южной Африке). Через пять лет здесь была открыта первая кимберлитовая трубка, а в течение 15 последующих лет в Южной Африке было найдено множество других кимберлитовых тел и добыто алмазов больше, чем за два тысячелетия в Индии. Сейчас кимберлиты обнаружены на всех материках, кроме Антарктиды, но весьма вероятно, что они есть и там, только скрыты под мощными толщами льда.



Кимберлит формируется в условиях верхней мантии Земли на глубинах более 100 км. Кимберлитовые тела образуются вулканическим путем, поэтому чаще всего имеют форму *трубок взрыва*; реже встречаются так называемые *дайки* – протяженные уплощенные образования размером от сантиметров до десятков метров.

Кимберлит выносит на поверхность ряд глубинных минералов – красный, оранжевый и фиолетовый *гранат (пироп)*, черный *пикроильменит*, желтовато-зеленый *оливин*, похожий на слюду *флогопит*, ярко-зеленый *пироксен (хромдиоксид)* и др. Вся эта каменная радуга является для кимберлита чуждым материалом, который был захвачен магматическим расплавом на месте своего зарождения и при продвижении сквозь толщу литосферы.

Кимберлит – магматическая порода порфирировой структуры, содержащая множество минеральных включений, – является основным коренным источником алмаза, но сам внешне весьма скромен

Карьер кимберлитовой трубки Айхал (Якутия)

Методология геологического поиска алмазов сродни таковой для криминалистов: и там и там нужно идентифицировать след (улики и индикаторные минералы соответственно) и локализовать объект (преступника и коренной источник)





«Каюр», 53,9 карата. Тр. Мир, 1992 г.



«Олонхо», 150,9 карата. Тр. Удачная, 1991 г.



«Сулус Таас», 104,1 карата. Тр. Сытыканская, 1992 г.



«Премьер», 210,6 карата. Тр. Мир, 1991 г.

Мантийные алмазоносные породы делятся на две основные группы – перидотиты и эклогиты, что обусловлено глобальной дифференциацией самого вещества Земли.

Группы различаются по содержанию окиси кремния: первая по сравнению со второй недонасыщена кремнеземом SiO_2 , который идет преимущественно на образование силикатных минералов – пиропов, пироксенов, оливинов. Алмазы, связанные с этими типами пород (тип Р – перидотитовые, тип Е – эклогитовые), также различаются по ряду показателей, в частности по набору минеральных включений, соответствующих составу материнских пород. В целом алмазы Р-типа представляют собой значительно более однородную группу, чем Е-типа. При этом различия между группами обусловлены не только разным характером материнской среды, но также источником углерода и условиями роста, отраженными в характере внутреннего строения и распределении размеров кристаллов.

Для алмазов типа Р характерен узкий диапазон колебаний изотопного состава углерода, что соответствует мантийному резервуару углерода; преимущественно послойный механизм роста и октаэдр как основная форма. Алмазы этого типа, как правило, крупные (более 0,5 мм) и обладают совершенной кристаллической структурой.

Для алмазов типа Е характерен, в первую очередь, широкий диапазон изотопного состава углерода, что соответствует углероду коры: от обогащенных тяжелым изотопом морских карбонатов до органического углерода. Морфологически они удивительно разнообразны, при этом встречается много кристаллов с дефектной кристаллической структурой, сростков и т. п. В основном такие алмазы представляют собой микрокристаллы и встречаются в породах в огромном количестве; вместе с тем среди них могут попадаться и крупные кристаллы высокого качества.

Для нашего героя – алмаза – кимберлит также служит лишь транспортером. И хотя кимберлитовые тела являются основным типом коренных алмазных месторождений, лишь десятая их часть содержит алмазы, и только очень немногие имеют промышленное значение. Так, на Сибирской платформе алмазоносны главным образом среднепалеозойские (позднедевонские) кимберлиты; более поздние мезозойские в большинстве случаев не содержат алмазов.

Кимберлит – вполне определенный тип магматической породы, но при этом находящиеся в нем алмазы демонстрируют яркий пример полигенеза. Это, в первую очередь, обусловлено упомянутой выше «чужеродностью» самого алмаза для кимберлита. Ведь последний

захватывает алмазы из мантии, проходя сквозь различные материнские алмазоносные породы. Обломки этих пород в виде *алмазоносных ксенолитов* – ценнейший источник информации об условиях, времени и месте образования алмазов.

Состав материнских пород отражается на минеральных включениях в алмазе. По их характеру алмазы делят на *перидотитовые* (тип Р) и *эклогитовые* (тип Е). Судя по изотопному составу углерода, его источником для алмазов первого типа послужила земная мантия, для второго – кора.

Распределение обоих типов алмазов в кимберлитах различается. По подсчетам Н. В. Соболева, в промышленных месторождениях Сибирской платформы более 96% алмазов принадлежат к перидотитовому типу. Однако среди алмазов якутской трубки Дьянга до 40% относится к типу Е, а в кимберлитах Венесуэлы (район Гуаньямо) почти все алмазы – эклогитовые.

Заметим, что почти все кимберлитовые алмазы в той или иной степени затронуты магматической коррозией. В результате агрессивного воздействия расплава кимберлита октаэдры превращаются в округлые до-

Именные ювелирные алмазы из кимберлитовых трубок Якутии

декаэдровиды, на поверхности кристаллов возникают многочисленные коррозионные фигуры. Хотя при этом облик кристаллов значительно меняется, к полигенезу это отношения не имеет.

Вместе с магмой

Следующий тип породы, формирующей промышленные алмазные месторождения, – *лампроит*. Эта магматическая порода хотя и не близнец кимберлиту, но, по крайней мере, его близкая родственница.

Несколько отличаясь от кимберлита по химическому составу и минералогии, лампроит также формирует трубки взрыва, далеко не все из которых содержат алмазы. Сами алмазы во многом аналогичны кимберлитовым. Так, в трубке Аргайл в Австралии – крупнейшем лампроитовом месторождении – алмазы полностью аналогичны по морфологии кимберлитовым, отличаясь лишь резким доминированием алмазов Е-типа с обедненным изотопным составом углерода.

В других лампроитовых телах (например, трубке Маджгаван в Индии и дайках Ингашинского поля



Во многих алмазоносных лампроитах содержится большее, по сравнению с кимберлитами, число округлых алмазов, представляющих собой результат растворения исходно октаэдрических кристаллов:
 а – типичные алмазы из кимберлитовой трубки Юбилейная (Якутия);
 б – округлые алмазы лампроитовой трубки Маджгаван (Индия). По: (Афанасьев и др., 2000)

в Восточном Саяне) содержится более значительная, в сравнении с кимберлитами, доля округлых алмазов додекаэдрического габитуса. Подобная форма кристаллов представляет собой результат растворения исходно октаэдрических алмазов.

Кристаллы округлой формы часто встречаются в разновозрастных россыпях алмазов по всему миру (в Бразилии, Индии, на Урале, в Восточном Саяне, на северо-востоке Сибирской платформы), в том числе и в многочисленных россыпях протерозойского возраста. Хотя сегодня коренные источники этих алмазов неизвестны, есть все основания выдвигать на роль последних именно лампроиты. Вероятно, древние россыпи впоследствии в значительной степени подверглись эрозии, и алмазы были переотложены в более молодые, в том числе и современные, россыпи.

Здесь нужно отметить, что семейство магматических алмазосодержащих пород пополнилось не только лампроитами. К настоящему времени алмазы обнаружены во многих других породах некимберлитового типа. Это лампрофилы Канады, коматииты Французской Гвианы, шонкиниты Узбекистана и т. д.

Первичная природа некоторых других алмазоносных пород, претерпевших сильные изменения, до сих пор остается загадкой (например, алмазоносные *филлиты* Бразилии). Но, так или иначе, круг экзотических магматических пород, содержащих алмазы, становится все шире, и это дает основания считать, что их перечень будет и дальше пополняться.

Однако потесниться пришлось не только кимберлиту...

Кокчетавский сюрприз

История открытия вышеупомянутого необычного алмазного месторождения Кумды-Коль началась еще в 1967 г. Тогда при исследовании молодых титан-циркониевых россыпей Кокчетавского массива симферопольские геологи нашли мелкие желтые алмазы кубической формы. Это стимулировало поисковые работы, но сами алмазоносные породы были обнаружены лишь к концу 1970-х гг.

И здесь геологов ожидал настоящий сюрприз. Коренным источником кокчетавских алмазов оказались

Коренными источниками алмазов могут быть не только изверженные магматические породы, такие как кимберлит, но и метаморфические, т. е. породы, которые прошли сложный путь превращений в недрах Земли в результате ряда физико-химических процессов

не магматические, а *метаморфические* горные породы, т. е. осадочные или изверженные породы, которые были затем существенно «преобразованы» в земной коре и мантии под воздействием химически активных веществ, высокой температуры и давления.

Когда и как образовались в метаморфических породах эти уникальные кристаллы?

Сам Кокчетавский массив имеет сложное геологическое строение и включает древнее (2,2–2,3 млрд лет) гнейсовое основание, перекрытое более молодыми отложениями. Согласно предположениям Н. В. Соболева и В. С. Шацкого, в раннем кембрии (530–540 млн лет) блок земной коры был погружен тектоническими процессами на глубину не менее 125 км. Горные породы при этом подверглись действию высокого давления и температуры (не менее 40 кбар и до 900 °С).

В результате из содержащегося в породах корового углерода образовались алмазы, что подтверждается их «облегченным» изотопным составом. Позднее блок алмазоносных пород вновь поднялся на поверхность.

Морфология кокчетавских алмазов оказалась чрезвычайно разнообразной, при этом сами кристаллы могли располагаться как в пространстве между зернами минералов, слагающих породу, так и внутри самих минералов: в гранатах, флогопите, кварце и др.

Необычная природа метаморфогенных алмазов, также как и их высокое содержание в породе, привлекли большое внимание ученых. Геологоразведка показала, что запасы алмазов составляют здесь около 3 млрд каратов при ураганном содержании – до сотен каратов на тонну породы! Единственное «но» – размеры этих алмазов очень невелики (в среднем около 20 мкм), что позволяет использовать их только в технических целях. При этом технология добычи очень сложна, поэтому месторождение было признано нерентабельным.

Не исключено, что происхождение, подобное кокчетавским алмазам, имели и кристаллы из графитизированных перидотитов Оспинского массива в Восточном Саяне, найденные еще в 1930-е гг. (это были первые обнаруженные в СССР коренные алмазы). К сожалению, эта коллекция была утеряна в военные годы.

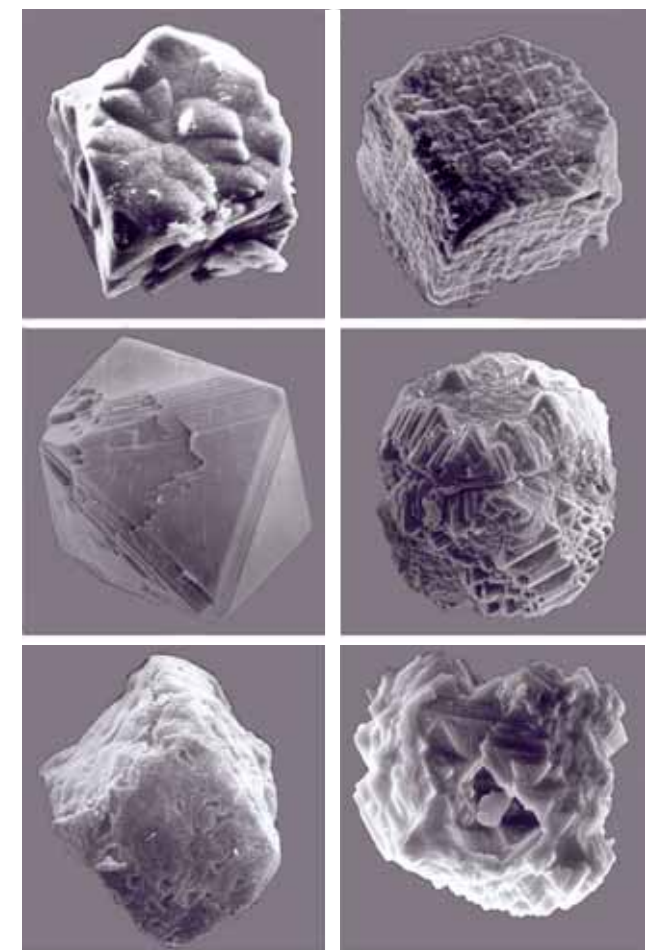
Отметим, что метаморфогенные алмазы не всегда могут выдержать подъем из земных глубин на поверх-

ность. В результате мы получаем так называемые *параморфозы* графита по алмазу, т. е. графит со всеми морфологическими признаками алмазов. Такие необычные образования обнаружены в разных регионах планеты (Испании, Марокко, на Урале и др.).

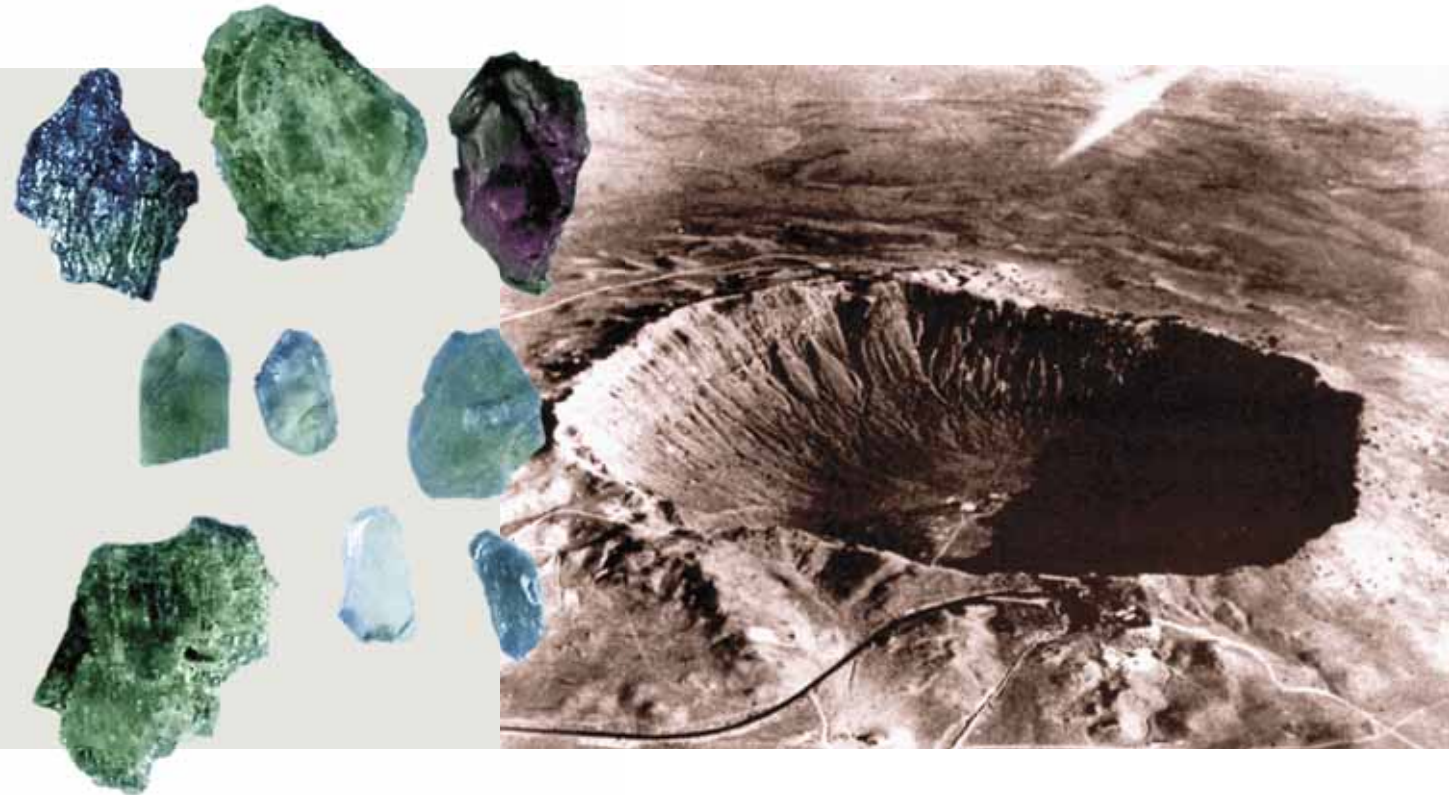
Посланцы небес

И все же, помимо вышеперечисленных, имеются еще более экзотические виды алмазоносных пород и алмазов, пусть и не имеющих промышленного значения. Пожалуй, наиболее необычными являются так

15 мкм



Среди характерных форм метаморфогенных алмазов из месторождения Кумды-Коль (Северный Казахстан) доминирует обычный для алмазов кубоид. Поскольку средние размеры кристаллов составляют лишь сотые доли миллиметра, их можно использовать только как абразивный материал. Электронная микроскопия. Фото А. Корсакова (ИГМ СО РАН, Новосибирск)

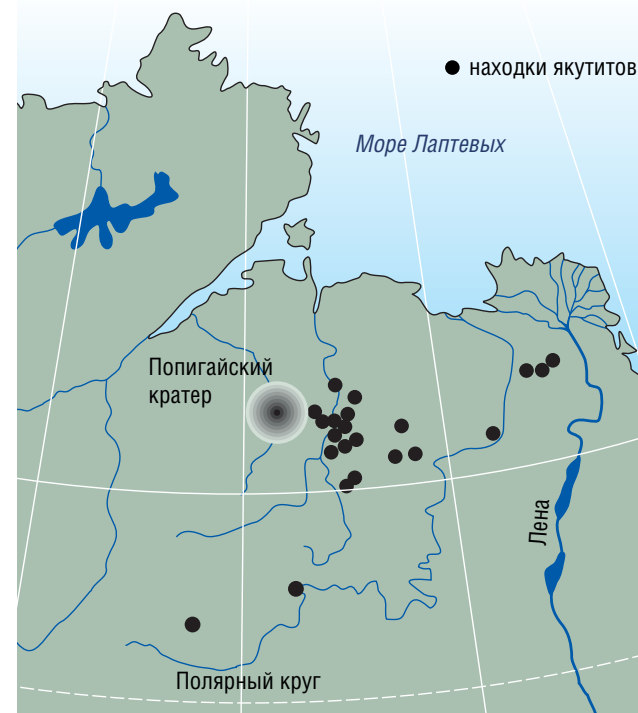


◀ Арizonский кратер (США), где в обломках железного метеорита найдены импактные алмазы.
Аэрофотоснимок Н.В. Соболева (ИГМ СО РАН, Новосибирск)

Карьер знаменитой якутской алмазоносной трубки Мир удивительно напоминает метеоритный кратер



▲ Якутиты – крупная фракция импактных алмазов, продукты дальнего закатерного выброса Попигайской астроблемы – обнаружены много восточнее самого кратера.
По: (Вишневецкий и др., 1997)



называемые *импактные* (от англ. *impact* – столкновение, удар) алмазы. Импактные процессы сопровождают высокоскоростные столкновения с планетами достаточно больших космических объектов (метеоритов или комет), в результате чего на поверхности планет образуются кратеры.

В настоящее время на Земле известно более 150 таких кратеров разного диаметра – от 100 м до 200 км и более. Один из наиболее крупных кратеров – астроблема Чиксулуб на п-ове Юкатан в Мексике – имеет диаметр 170 км и возраст около 65 млн лет. Предположительно, именно в это время, на рубеже мелового и палеогенового периодов, произошло грандиозное вымирание организмов, в том числе динозавров.

Возраст другого крупнейшего кратера – Попигайской астроблемы диаметром около 100 км у п-ова Таймыр – насчитывает около 35 млн лет. Планетарный катаклизм, вызвавший образование этого кратера, связывают с еще одним крупным вымиранием биоты в позднем эоцене.

Среди относительно «молодых» кратеров – Пучеж-Катунская астроблема недалеко от Нижнего Новгорода (80 км, 183 млн лет). Вообще, чем древнее кратер, тем сложнее доказать его космогенное происхождение, однако для некоторых подобных структур это сделано. Среди последних можно упомянуть астроблему Вредефорт в Южной Африке (1,97 млрд лет) и Садбери в Канаде (1,84 млрд лет).

При высокоскоростных столкновениях с планетой крупных метеоритов из углеродсодержащих веществ могут образовываться импактные алмазы

Глубокое преобразование вещества мишени при импактных процессах – *ударный метаморфизм* – обеспечивается главным образом за счет действия ударных волн, создающихся при высокоскоростном столкновении. Эти процессы характеризуются экстремальными параметрами, включая импульсные давления до 3 тыс. ГПа и более, а также остаточными постударными температурами до 30 тыс. градусов! В таких условиях из углеродистых веществ (графит, уголь) и рождаются специфические импактные алмазы.

Первые такие алмазы (их природа была установлена позже) обнаружили в 1888 г. в метеорите Новый Урей русские исследователи М. В. Ерофеев и П. А. Лачинов. Позднее импактные алмазы нашли и в обломках железного метеорита Арizonского кратера.

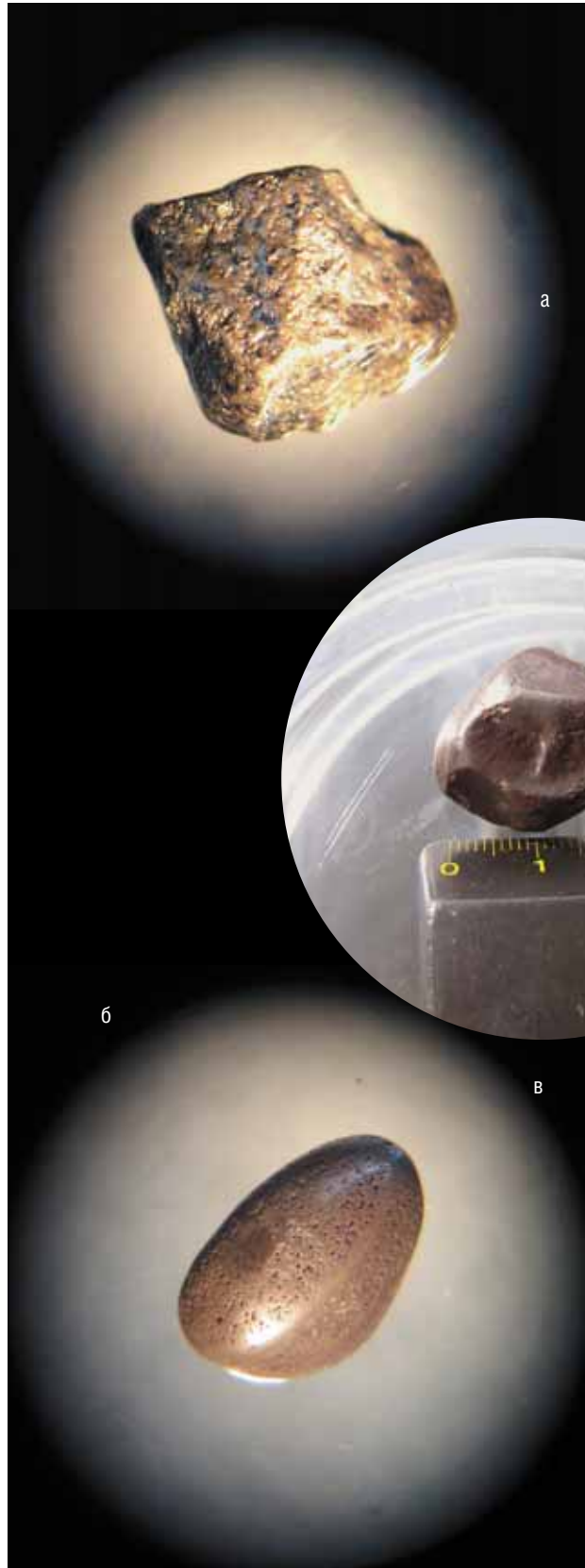
Первая находка импактных алмазов непосредственно в породе самого метеоритного кратера (Попигайской астроблемы) была сделана почти сто лет спустя также нашим соотечественником, геологом Л. Масайтисом. Впоследствии импактные кристаллы обнаружили и в ряде других кратеров, а также в осадочных породах за пределами кратеров, куда алмазы попадают в результате выброса породы в момент столкновения.

Импактные алмазы, представляющие собой параморфозы по исходному углеродистому веществу, наследуют некоторые особенности последнего, в частности морфологию графитовых частиц и изотопный состав углерода.

Что касается структуры, то это поликристаллические тонкозернистые агрегаты с размерами кристаллитов от нескольких нанометров до микрон. Сами зерна тоже невелики: например, в Попигайской астроблеме их размер колеблется в пределах 0,1–0,5 мм, очень редко достигая 10 мм (Вишневецкий и др., 1997).

Важнейшей особенностью импактных алмазов является присутствие в них *лонсдейлитовой фазы* – особой гексагональной модификации алмаза, характерной только для ударно-метаморфических процессов. Последняя неустойчива и при высокой температуре отжигается в кубическую. Имеются сведения, что эта модификация алмаза по прочности может значительно превышать обычную.

Энергетика такого импактного события, как, например, Попигайское, чрезвычайно высока. Так называемые *якутиты* – крупная фракция импактных алмазов размером до 1 см – обнаружены на расстоянии более 500 км от кратера. Чтобы пролететь такое расстояние, выбросы из кратера должны были иметь начальную скорость 2,2–2,4 км/с при углах наклона траектории 40–60°. А часть испаренного при столкновении ве-



щества предположительно имела в вертикальной струе скорость до 14,6 км/с! Таким образом, мельчайшее вещество, включая импактные алмазы, могло разнестись воздушными потоками на огромные расстояния (Вишневецкий и др., 1997).

Количество алмазов, которые можно обнаружить в астроблемах, очень различается. Что касается перспектив промышленной разработки подобных месторождений, то, например, отдельные блоки той же Попигайской астроблемы могли бы стать источником высококачественных технических алмазов. Однако удаленность и высокая себестоимость делают пока их добычу нерентабельной.

Пористые и волокнистые

Выше мы рассмотрели ряд более или менее изученных алмазоносных коренных источников. Однако в россыпях присутствуют и такие экзоты, чье происхождение до сих пор остается загадкой.

В первую очередь это уже упоминавшиеся *карбонадо* (от лат. *carbo* – уголь), которые добывались в россыпях Бразилии в первой половине XIX в. наряду с обычными алмазами. Помимо Бразилии карбонадо встречаются и на западе Африки; подобный ареал, очевидно, связан с распавшимся в мезозое праматериком Гондвана, где Африка и Южная Америка составляли одно целое.

«Угольные» алмазы представляют собой микрополикристаллические образования неправильной формы, часто сильно окатанные, черного, коричневого, бурого и серого цветов. Карбонадо насыщены посторонними силикатными и окисными минералами, которые с течением времени выщелачиваются, в результате чего алмаз становится пористым. Специфическая форма карбонадо заставляет предположить, что все они представляют собой фрагменты (обломки) одного крупного тела.

Узнать в этих невзрачных пористых булыжниках алмаз-карбонадо сможет только опытный взгляд. Предположительно все карбонадо представляют собой обломки одного алмазного тела, разрушившегося около 2 млрд лет назад. Самый крупный карбонадо (3167 карат, или 633 г) найден в 1905 г.

Типичные образцы карбонадо:
а и б – слабо окатанный и окатанный из Бразилии;
в – слабо окатанный из Гвинеи.

Фото автора



Кристаллы этих экзотических алмазов из россыпей междуречья Лены и Анабара, несмотря на явные проявления огранки, имеют радиально-лучистое строение с грубыми волокнами, выходящими из центра. Коренной источник их неизвестен.
По: (Афанасьев и др., 2000)

Существует много гипотез относительно образования этих алмазов. Возможно, блок земной коры с массивным высокоуглеродистым телом типа *шунгита* (древнего метаморфизованного каменного угля) погрузился в мантию в раннем протерозое, где подвергся действию глубинных факторов, а затем вновь поднялся на поверхность. Это, теперь уже «алмазное», тело подверглось эрозии, и его фрагменты отложились в россыпях.

Есть много сообщений о находках карбонадо в районах за пределами указанного, однако при этом используется лишь один критерий сходства – поликристаллическое строение, что явно недостаточно для надежной диагностики.

Не менее экзотические, чем карбонадо, алмазы были найдены в россыпях северо-востока Сибирской платформы (междуречье Анабара и Лены). Это довольно крупные (3–8 мм и более) кристаллы октаэдрического или додекаэдрического габитуса, переполненные черными включениями. Кристаллы имеют легкий изотопный состав углерода, указывающий на его коровое происхождение. Алмазы часто сильно окатаны, что косвенно указывает на древний (докембрийский) возраст их коренного источника.

Перечисление необычных разновидностей алмаза можно было бы продолжить. Но и уже сказанного достаточно, чтобы оценить все его природное разнообразие как по минералогическим особенностям, так и по происхождению.

Изотопный состав углерода значительной части алмазов свидетельствует о том, что их источником могли быть коровые породы, погруженные в мантию в процессе *субдукции* – поддвижения тонкой океанической коры под мощную континентальную литосферу.

Для алмазов, чей углерод имеет мантийное происхождение, пока нет четких представлений о механизмах их кристаллизации. Сегодня обсуждается и возможность кристаллизации природных алмазов в *метастабильных* условиях (в частности, для Кокчетавского массива), т. е. в условиях, когда они могут находиться в неизменном состоянии длительное время без перехода в графит. Но эта гипотеза требует привлечения слишком большого числа дополнительных условий, что делает ее практически нереальной.

Даже этот неполный обзор показывает, что геологи вынуждены выйти за рамки кимберлитовой парадигмы в отношении алмаза. И хотя взамен мы имеем пока только идею полигенности, логика научного поиска неизбежно приведет нас к новому пониманию происхождения и новым методам поиска этого не перестающего нас удивлять кристаллического углерода.

Литература

Афанасьев В. П., Ефимова Э. С., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И. *Атлас морфологии алмазов России*. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 2000. – 293 с.

Вишневецкий С. А., Афанасьев В. П., Аргунов К. П., Пальчик Н. А. *Импактные алмазы: их особенности, происхождение и значение*. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. – 54 с. (рус., англ.)

Орлов Ю. Л. *Минералогия алмаза. 2-е издание*. М.: Наука, 1984. – 264 с.

Чепуров А. И., Федоров И. И., Сонин В. М. *Экспериментальное моделирование процессов алмазообразования*. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. – 197 с.

В публикации использованы фотографии из архива К. П. Аргунова (Государственное хранилище ценностей Республики Саха)



*Встречают по одежке...
Подтверждения этой истины мы видим на каждом шагу. Ведь костюм, как ничто другое, может многое поведать о своем владельце: уровне дохода, вкусе и привычках; даже об образовании и широте кругозора... Но если так красноречив наш современный костюм, то что же говорить о традиционном, каждая деталь которого отбиралась веками! Простой или сложный, народный костюм является квинтэссенцией не только материальной, но и духовной культуры многих поколений. Вот только язык его понятен лишь историку-этнографу... Публикация о костюме сибирских старообрядцев начинает цикл статей, посвященных этнографической экспозиции Музея истории культуры народов Сибири и Дальнего Востока Института археологии и этнографии СО РАН. Основное ядро богатых этнографических коллекций музея, созданных по инициативе академика А.П. Окладникова, составляют сборы 1960—1980-х гг. с мест компактного проживания коренных народов и русских переселенцев*



Красочные, богато орнаментированные орудия ремесла, как эти самопрядка, прядка и станок для тканья поясов, привносили в будни сибирских крестьян элемент праздника

СИБИРСКИЕ СТАРООБРЯДЦЫ:

ИСТОРИЯ В КОСТЮМАХ



ФУРСОВА Елена Федоровна – доктор исторических наук, ведущий научный сотрудник отдела этнографии Института археологии и этнографии СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор более 170 научных работ

На фото – автор в праздничном костюме семейских (сибирских старообрядцев). Забайкалье, 1977 г.

Предметы крестьянского быта этнографической экспозиции, посвященной русскому населению Сибири, собраны Ф. Ф. Болоневым, Л. М. Русаковой, Е. И. Дергачевой-Скоп, Н. П. Зольниковой, Е. Ф. Фурсовой

К началу XX в. русское население Западной Сибири по своему происхождению и культурным особенностям являло собой довольно пеструю картину.

Среди сибиряков – потомков первопоселенцев XVII – первой половины XIX вв. наиболее распространенной этнографической группой были «чалдоны», уже утратившие воспоминания о конкретных местах выхода. Однако эти зажиточные старожилы продолжали позиционировать себя с донским казачеством и первым покорителем Сибири Ермаком.

Особое место среди русских сибиряков занимали старообрядцы: как поздние переселенцы начала XX в., в основном с Урала и Поволжья («двоеданы», «курганы»), так и старожилы («кержаки», «поляки», «семейские»).

«Поляки» Алтая представляли собой потомков русских старообрядцев, которые в конце XVII–начале XVIII вв. бежали от преследований за веру из разных мест России на земли, входившие в то время в состав

Польши. В 1760-х гг. они были насильно высланы в указанный Екатериной II район Южного Алтая, где их по прежнему месту жительства стали называть «поляками». Другая часть высланных в Сибирь старообрядцев осела в Забайкалье, где получила название «семейских» по будто бы имевшему место порядку переселения семьями (Болонев, 1992).

Такая специфика этнокультурного состава русских сибиряков не могла не отразиться на их материальной культуре, которая в XIX – начале XX вв. демонстрировала уникальное слияние или сосуществование различных региональных традиций Европейской России.

И в этом смысле одним из наиболее показательных объектов является этнический костюм – истинное средоточие художественного вкуса народа, его духовных и религиозно-мировоззренческих установок. Ниже мы аргументируем это положение на примере традиционной одежды сибирских старообрядцев – «поляков» и семейских.

По образу Христа

Своеобразной частью мужского костюма русских старообрядцев-«поляков» Алтая была холщовая обрядовая (свадебная) рубаха. Уже в XIX в. их туникообразный покрой был архаичным явлением. Носили такие рубахи в комплексе со штанами общерусского покроя из прямых и раскошенных полотен, по талии подпоясывали самоткаными поясами с кистями.

Главная особенность такой рубахи заключается в композиции богатой декоративной вышивки на левой стороне груди, элементы которой образовывали крестовидную фигуру, а также в двух вертикальных полосках кумача, нашитых вдоль швов, соединяющих центральное и боковые полотна. Эти полоски украшались «меандрами» (орнаментом в виде непрерывно повторяющихся закрученных спиралей), квадратами, вышитыми нитками белого и голубого цветов, контрастными по отношению к кумачу. По двум сторонам от полосок вышивались узоры геометрического харак-

тера, с помощью которых полоски органично вписывались в композицию.

Декоративные кумачовые полоски «поляцких» обрядовых рубах Алтая выполняют вполне определенную художественную задачу: они подчеркивают форму и покрой, так что обилие отделок в рубахе не воспринимается как хаотическое нагромождение. Но когда и как появились в русской одежде эти приметные декоративные элементы?

Нужно отметить, что к XIX в. традиция прокладывать декоративные полосы вдоль конструктивных швов сохранилась в русском костюме лишь для отдельных видов женской одежды (Куфтин, 1926). В южнорусских губерниях в это время швы мужских праздничных рубах также еще украшались вышивками или кумачом, но в общем декоративном решении они играли достаточно скромную роль.



Что касается более раннего времени, то на реставрированных рубахах русской знати XVI — начала XVII вв., хранящихся в Архангельском соборе Московского Кремля и в Государственном Историческом музее, швы уже были окаймлены тесьмами и лентами, хотя и значительно более узкими, чем полосы кумача в рубахах сибирских старожилов (Кошлякова, 1986). Кроме того, у них отсутствовало нарядное узорочье по груди.

А что если углубиться в еще более стародавние времена? В древнерусских летописях, прежде всего Радзивиловской (XV в.), внимание привлекают изображения священнослужителей из Чернигова, одетых в длинные, до пят, туники, украшенные контрастными отделками по вороту, краям подола и рукавов. И на всех этих одеждах от плеча до самого низа тянутся две знакомые продольные полосы. Правда, «летописные» рубахи отличаются от староверческих значительно большей длиной, наличием круглого плеча и отсутствием нагрудной вышивки (Рыбаков, 1976).

К VIII—IX вв. в православной церкви уже сложилась достаточно устойчивая иконографическая традиция, в том числе и относительно изображения костюмов Христа и святых: белая туника с двумя вертикальными полосками с меандрическим орнаментом красного и синего цветов. Подобные одеяния мы можем увидеть на византийских и, позднее, древнерусских иконах. Именно такой костюм, одобренный постановлениями византийских соборов, и служил с VI в. одеждой христианских священнослужителей (Коммисаржевский, 1910; Кибалова и др., 1986). Подтверждением

Белая туника с продольными кумачовыми полосками еще в древние времена была в Западной Европе одеждой высшего духовенства и знати.

Слева — Святой ковчег. Фрагмент стеной росписи синагоги III в. Раскопки г. Дура-Европос (соврем. Сирия). По: (Шлюмберже, 1985).

Справа — Богоматерь с младенцем Христом. Прорисовка фрагмента стеной росписи IV в. По: (Кн. История Древнего Рима, 1982)

этому являются, например, изображения на известной мозаике церкви Святого Виталия в итальянской Равенне, бывшей некогда западной столицей Византийской империи.

А теперь обратим взор на Запад. Оказывается, туники с продольными нашивками («клавами») бытовали в летописные времена и в одежде духовенства и высшей знати Западной Европы (Ястребицкая, 1978). Даже вышивка у ворота на этих рубахах, как и в старообрядческих, расчленилась на ряд столбцов. Одежду с «клавами» можно видеть и на настенных росписях в Риме II—IV вв., изображающих Богоматерь, и на культовых портретах из римской провинции Эль-Фаум, на статуях и росписях в Парфии, образцах коптской одежды (Кибалова и др. 1986; История Древнего Рима, 1982; Шлюмберже, 1985).

Очевидно, что подобная одежда распространилась как в Византии, так и в Западной Европе под римским влиянием. Первоначально туника с узкой пурпурной каймой служила знаком отличия благородного (всад-



Мужская обрядовая рубаха старообрядцев-«поляков» из экспозиции Музея ИАЭТ СО РАН относится ко второй половине XIX в. (д. Малоубинка Глубоковского района Восточно-Казахстанской области — исторической территории Южного Алтая)



Основу женского праздничного костюма семейских Забайкалья составлял типичный русский сарафан

Рисунок вышивки на обрядовой рубахе сибирского старообрядца имеет не только христианские символы в виде креста, но и пересеченные квадраты – древние языческие символы плодородия. В музеях России (Санкт-Петербург, Омск, Барнаул) сохранилось всего порядка десяти мужских рубах сибирских «поляков», датируемых второй половиной XIX в.

креста состоит из пересеченных квадратов с крючками и без них – типично языческих элементов, обычно трактующихся как символы плодородия. Подтверждением этого служат известные образцы вышивок поляцких рубах, дополненные изображениями хлебных колосков. Такая традиция «уживчивости» христианского и языческого семантических рядов была характерна для древнерусского костюма XII – начала XIII вв. (Рыбаков, 1981).

Запон, кучери и антари

Своего рода визитной карточкой другой этнографической группы старообрядцев – семейских Забайкалья – является удивительно нарядный и красочный комплекс женской праздничной одежды. Его предназначение подчеркнуто выбором материала (легкие шелковые ткани), нарядной шалью и обилием декора – янтарными бусами, мишурой, расшитым золочеными нитями кокошником.

Женские рубахи семейских имели общеславянский покрой с присборенными прямоугольными полками (вставками на плечах) и станом, состоящим из верхнего «чехлика» и нижней «станушки». Верхняя часть изготавливалась из дорогих покупных материалов (бурса, атласа, канфы и др.), нижняя – из дешевых (холста, ситца, бумазеи). Праздничные рубахи делались с «расшивкой», т.е. орнаментальным украшением оплечья в виде аппликаций из полосок разноцветной ткани, фигурных строчек. В старинных рубахах-«чухлатках», по словам жителей с. Бичура, рукава делали в две ши-

рины полотна с «абшлагами», т.е. манжетами. Воротник в виде стойки носили отогнутым вниз, а ворот застегивали на брошки-«запонки».

Поверх рубах надевали легкие хлопчатобумажные юбки для создания большего объема на бедрах; зимой их шили из шерстяных тканей. «Так шадрей (пышней)», – говорили семейские во время работы этнографической экспедиции в 1977 г.

Прямые ляпочные семейские сарафаны были типичны для центральных районов России. Ткани на сарафан не жалели: на перед использовали два полотна, а на спинку – четыре. Всего на изготовление такого сарафана требовалось около 6 м ткани! Спереди по низу сарафанов пришивались украшения в виде лент. Пожилые женщины и старухи лент не носили, считая это греховным и нескромным: с наступлением определенного возраста эту декоративную деталь отпарывали.

Сарафаны подпоясывали поясом, тканым из покупной шерсти «гаруса», шелка, хлопчатобумажной пряжи. В 1970-е гг. в семьях крестьян еще хранились многочисленные самотканые пояса, а доживающие свой век местные ткачихи-мастерицы были рады показать свое умение.

Поверх сарафана по традиции надевался запон, который всегда изготавливался с нагрудником. Раньше, во времена бытования длинных



нического) состояния (кайма сенаторской туники была широкой). И лишь позднее она переродилась в атрибутику христианского культа.

Вот такую длинную историю поведали нам две полоски кумача на рубахах сибирских староверов. Очевидно, что традиция подчеркивать декоративными полосами конструктивные швы и украшать ворот крестообразной вышивкой появилась на Руси во время принятия ею христианства в греко-византийском варианте. Такая одежда отвечала требованиям эстетики феодального мира, отражала распространенную мировоззренческую установку – не только внутренне, но и внешне соответствовать образу «истинного» христианина. И недаром она сохранилась у сибиряков – выходцев с Черниговщины, Брянщины и Гомельщины, настоящего «заповедника» традиционной культуры восточнославянских народов.

О силе этих традиций свидетельствует еще один интересный факт: наряду с ярко выраженной христианской атрибутикой староверческие рубахи несут и гораздо более древние символы! Нагрудная вышивка в форме



Сокровища сундука – вышитый бисером бархатный назытьльник и златотканые шелковые кокошники, некогда украшавшие головы семейских модниц. А такими вышитыми полотенцами оформляли в красном углу, напротив входной двери, иконы



В доме старообрядцев органично уживались красочные кустарные изделия, как эти берестяные туеса, и предметы промышленного производства (например, самовар и угольный духовой утюг), также изукрашенные по моде того времени

сарафанов, длинными шили и запоны: «Мама носила запон, который ичиги (вид самодельной обуви) закрывал», – вспоминала одна из жительниц с. Бичура.

Девушки заплетали одну косу, а замужние плели две косы, которые перекрещивали на темени и сверху прикрывали кичкой, имевшей спереди твердую часть в форме копытца. На кичку надевали золотошвейный чехол – «кокошник». Сзади волосы прикрывались прямоугольной полоской ткани – «подзатыльником», расшитым позументом и бисером. Поверх всего этого сложного убора повязывалась свернутая полосой шаль-«атлас» в виде чалмы, к которой прикреплялись букетики цветов или брошки, подтыкались «кучери» из перьев селезня. Причем, судя по рассказам старожила д. Большой Куналей, еще в начале XX в. старики не разрешали местным модницам носить брошки и булавки, приравнивая это к греху.

На груди, особенно в праздники, красовались бусы-«антари», которые очень ценились и передавались от матери дочерям. Нам показывали янтарные бусы, приобретенные еще на Русском Севере и хранившиеся в семьях на протяжении 5–7 поколений.

Такой комплекс женской одежды семейских, потомков выходцев из западных территорий Российской империи, сформировался в результате сложных взаимодействий разных региональных вариантов традиционного славянского костюма. Типично северорусская основа с сарафаном была трансформирована под белорусским и западнорусским влиянием. Последнее выразилось в терминологии предметов костюма (напри-

мер, «чехлик», брошка-«запонка»), сложном способе подвязывания шалей в виде короны (характерном для Слуцкого р-на Центральной Белоруссии), отложном воротнике-стойке рубах, нетипичной для России яркости и красочности отделок.

В результате сформировалась достаточно самобытная традиция праздничного женского костюма, просуществовавшая практически без изменений до середины XX в. Еще в 1970-х гг. у многих женщин в заветном сундучке хранились подлинные семейские костюмы, в одном из которых и довелось сфотографироваться автору статьи.

Важнейшим источником разнообразной этнографической информации сегодня может служить традиционная одежда, хранящаяся в музеях.

Так, экспонаты Музея ИАЭТ СО РАН – костюмы двух потоков старообрядцев, переселенных на Алтай и в Забайкалье, – позволили нам проследить родственные связи групп «поляков» и семейских, а также их связь с населением из бывших мест проживания в Белоруссии и на Украине.

Но традиционному костюму уготована не только тихая музейная жизнь. Красочные одежды сибирских старообрядцев стали своего рода эталоном народного костюма для фольклорных коллективов, исполнителей народных песен и просто любителей старины, получив таким образом новую жизнь в среде городских жителей.

Русские принесли на сибирские земли свои исконные занятия – хлебопашество в сочетании с домашним содержанием скота и птицы. Переработка сырых материалов переросла в ремесла (кожевенное, овчинно-шубное, шерстобитно-пимокатное, ткачество, деревообработку и т. д.).

Предметы женского рукоделия, ткачества, а также домашняя утварь зачастую представляли собой не просто утилитарные предметы, но настоящие произведения декоративно-прикладного искусства. Так, поверья, связанные с птицей, воплотились в художественные образы, которые оказались чрезвычайно живучими не только в фольклоре, но и орнаментике женских рукодел и росписях прялок. Точные формы, прекрасные пропорции, радующие глаз цветастые орнаменты обыденных вещей создавали в крестьянской избе праздничное настроение.

Литература

Болонев Ф. Ф. Семейские: историко-этнографические очерки. – Улан-Удэ, 1992.

Кибалова Л., Гербенцова О., Ламарова М. Иллюстрированная энциклопедия моды. – Прага, 1986.

Коммисаржевский Ф. Ф. Костюм. – СПб., 1910.

Мерцалова М. Н. Костюм разных времен и народов. – М., 1993. – Т. 1.

Русский народный костюм. – Л., 1984.

Швецова М. В. «Поляки» Змеиногорского округа // Записки Западно-Сибирского отдела РГО. 1899. Кн. 26.

Редакция и автор благодарят к. и. н. И. В. Сальникову, заведующую музейно-источниковедческим сектором ИАЭТ СО РАН (Новосибирск), за помощь в подготовке публикации



В. В. ВЛАСОВ, В. Е. РЕПИН, В. С. ПРАСОЛОВ, Г. А. КАРПОВ



ВЛАСОВ Валентин Викторович – академик РАН, доктор химических наук, директор Института химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН (Новосибирск). Лауреат Государственной премии РФ (1999)



РЕПИН Владимир Евгеньевич – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией микробиологии Института химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН (Новосибирск)



ПРАСОЛОВ Владимир Сергеевич – доктор биологических наук, заведующий лабораторией биологии клетки Института молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН (Москва)



КАРПОВ Геннадий Александрович – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией постмагматических процессов и заместитель директора Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский)

Многоголосый шепот УЗОНА

ФОТОРЕПОРТАЖ В. В. ВЛАСОВА

На слух Узон воспринимается как многоголосое шептание: это поют крошечные парагазовые струи, со свистом и шипением вырывающиеся из недр на волю. Кальдера этого затухающего вулкана – как чаша, сверкающая разноцветными красками среди суровых холодных гор, где парят теплые источники и бродят непуганые медведи. Именно здесь снимали фильм по известному роману Обручева «Земля Санникова»; туристы-экстремалы из разных стран сегодня готовы платить большие деньги и сутками ждать вертолета, чтобы хотя бы на пару часов попасть в этот труднодоступный, но такой манящий уголок Камчатки. Но фантастический, затерянный на краю света мир не только Мекка для любителей природы, но и естественная лаборатория, притягательная для ученых, занимающихся проблемами происхождения жизни



КАЛЬДЕРА (от исп. *caldera* – большой котел) – впадина с крутыми стенками и более или менее ровным дном, образовавшаяся в результате провала вершины вулкана вследствие мощного взрыва, но чаще – обрушивания или оседания кровли над изверженными массами. От кратера кальдера отличается происхождением и большими размерами (в поперечнике до 10–15 км и более). Часто кальдеры заняты озерами, к ним приурочены фумаролы и грифоны.

ФУМАРОЛА (от итал. *fumo* – дым) – источник горячих газов в кратерах и на склонах вулканов, а также в корке остывающих лавовых потоков. Как правило, над крупными фумаролами клубится густой пар, поскольку в магме содержится большое количество воды. Помимо воды, через фумаролы выделяются газы, растворенные в магме: углекислый газ, оксиды серы, сероводород, галогеноводороды и др. Фумарольные дымы могут быть опасны для человека, но для некоторых видов бактерий они являются питательной средой.

ГРИФОН – выход подземной воды из водоносной породы сосредоточенной струей, поднимающейся выше поверхности земли или дна водоема

Вулкан – одно из самых впечатляющих проявлений могучих сил природы – всегда рождает желание разобраться, каким образом работает эта природная лаборатория, где происходят во многом еще не познанные процессы выноса и трансформации глубинной энергии и вещества Земли.

Но человеку опасно находиться вблизи кратера активного вулкана: интенсивность его извержения непредсказуема, а температура лавы превышает 1000 °С; возможны выбросы ядовитых газов, горячего пепла. Другое дело – затухающие вулканы, чьи магматические очаги еще достаточно горячи, чтобы прогреть периферийные районы и питать теплом гидротермальные системы в течение десятков тысяч и даже миллионов лет. Такие объекты – излюбленное место работы вулканологов, геологов и биологов.

Одной из уникальных современных рудообразующих гидротермальных систем нашей планеты является кальдера затухающего вулкана Узон, которая расположена в поясе действующих вулканов Восточной вулканической зоны Камчатки. Она находится всего лишь в 80 км

к северу от Петропавловска-Камчатского, но попасть туда непросто...

Камчатский оазис

Первые публикации о горячих источниках Узона появились после экспедиций под руководством Карла фон Дитмара, организованных Российской академией наук в 1851–1855 гг. Кальдера Узона произвела на Дитмара неизгладимое впечатление: «Мы остановились на краю старого колоссального кратера. Здесь, в области снега и полного отсутствия растительности, словно какое-то чудо, развернулась перед нами исполинская котловидная долина, из глубины которой нам улыбнулась сочная зелень роскошной растительности».

С вертолета кальдера смотрится гигантским сказочным ковром размером 9 × 12 км, где голубыми блюдцами выделяются многочисленные крупные и мелкие озера. Как седобородые джинны, стоят султаны пара над кипящими источниками. Всюду змеятся ручейки горячей воды, окрашенные примесями минеральных

солей и колониями бактерий и водорослей во все цвета спектра.

Кальдера расположена в западной части крупной Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии, названной по двум структурам, ее составляющим, включая открытую через 100 лет после экспедиции Дитмара Долину Гейзеров.

Кальдера Узона – достаточно древнее образование. Около 370–750 тыс. лет назад на месте современной депрессии существовал крупный щитовой вулкан. Во второй половине среднего плейстоцена в результате взрывной деятельности в восточной части вулканического сооружения образовался гигантский кратер, из которого изливались мощные потоки стекловатого, кислого по составу материала. Оставшаяся в кратере лава вспенилась, образовав пемзовые отложения на востоке кальдеры.

Современный облик кальдеры сформировался около 40 тыс. лет назад после мощных подвижек сбросового и раздвигового характера.

На дне горячей чаши

Дно кальдеры представляет собой довольно плоскую низину, поднятую над уровнем моря на 650 м. Борта, сложенные черными базальтами, поднимаются вверх еще на 500–950 м. Далеко на юге отчетливо синее вулканический массив Зубчатка. Есть верная примета: когда его островерхий гребень не затянут облаками – можно не бояться ухудшения погоды.

В широтном направлении кальдера пересекается серией тектонических разломов, по которым на поверхность выходят горячие растворы. Своим теплом они прогревают окрестные породы, благодаря чему в узкой, шириной не более 200–400 м, полосе кальдеры на протяжении 1,5–3 км практически не бывает снега. Озера с голубоватой и зеленоватой теплой водой привлекают уток, нередко остающихся здесь на зимовку.

На прогретых частях кальдеры, называемых *термальными полями*, – сотни мелких парогазовых проколов, бессточных воронок, грязевых котлов



Новое здание исследовательского стационара в кальдере Узона построено на средства проекта «Микробное разнообразие для применения в биотехнологии» Министерства энергетики США

На Восточном термальном поле выделяется красивое озеро, напоминающее своей формой цифру 8. Вода в озере мутная из-за взвешенных частиц глины

и грифонов с бурлящей водой. Суммарный вынос тепла естественными теплоносителями составляет 70 тыс. ккал/с. Температура воды в больших источниках достигает 96 °С, что соответствует точке кипения на высоте 650 м. Источники интенсивно парят перед плохой погодой, предвещающей понижением атмосферного давления. В мелких лужицах-кратерах слышится бульканье кипятка, в более крупных выходах – уханье периодически вздымающихся фонтанов воды или жидкой грязи.

С юга к парящей равнине подходит топкая, заболоченная тундра с участками сухих полей, обильно заросших ягодником – голубикой, жимолостью и шикшей. На востоке и северо-востоке дно кальдеры несколько повышено. Здесь и на невысоких холмах остальной части кальдеры растет вечнозеленый кедровый стланик. В центральной части чаши виднеются группы прямостоящих берез и камчатских сероватых каменных берез с изогнутыми, подагрически обезображенными наростами ветвями.

В северном секторе кальдеры находятся пять термальных полей. Самым крупным по площади и мощным по выносу тепла является Восточное, протянувшееся на 1,5 км в широтном направлении. Это излюбленное место исследований для вулканологов и биологов. Здесь, прямо на берегу ручья, стоит их приют. Несколько лет назад старое здание стационара закончило свой век, а вместо него выстроено новое.

Восточное термальное

Восточное термальное поле начинается с озера Банное. Его глубокая чаша наполнена мутной серовато-белесой водой чрезвычайно комфортной температуры (39–45 °С). Благодаря наличию радона купание в озере успокаивает нервную систему: дневная усталость снимается мгновенно, переходя в приятную истому.

Конфигурация самого водоема и характер береговых отложений дают основания считать, что озерная воронка образовалась в результате взрыва. В июле 1989 г. на Банном озере произошел новый взрыв. Оказалось, что в озере существует ложное дно на глубине 32 м – корка расплава самородной серы.

Центральная часть поля представляет собой плоскую низину, покрытую мелкозернистым гравием темного цвета – обломками шлаков, базальтов, кусочками пемзы. Во множестве крупных и мелких воронок бурлит горячая вода и грязь – суспензия глинистых минералов. Большая часть воронок – бессточные; хотя температура воды в них не превышает 70–80 °С, она «кипит» за счет выделения вулканических газов.

Рядом с воронками с прозрачной водой соседствуют грифоны с мутной и грязевые котлы. Иногда воронки сливаются друг с другом, образуя систему «блюдец» с тонкими перемычками. Грунт в таких местах очень зыбкий, а под ним на глубине уже первых десятков сантиметров температура превышает 100 °С. Неосторожные путешественники часто попадают в беду, провалившись в жидкую глину: выбраться трудно, а жар



Глинистые участки с грязевыми котлами – как огромная модель лунного ландшафта с кратерами вулканов

быстро становится нестерпимым даже сквозь резиновые сапоги. Неизменное правило исследователей – ходить в этих местах в высоких резиновых сапогах большего размера, которые можно быстро сбросить.

Северный борт термального поля представляет собой высокую террасу, где обильно растут ягоды. Непосредственно у термального поля борт террасы расчленен на пологие бугры, южные стороны которых лишены растительности. Они сверкают на солнце мокрыми глинистыми боками с разноцветными разводами и тонкими, зонально окрашенными кольцами, в центре которых видны мелкие отверстия, по которым просачивались растворы. На глинистых склонах встречаются глубокие (до 1,5–2 м) провалы, где плюхает и бурлит перемешиваемая газами густая глинистая масса.

На возвышенных участках видны развалы туфов с обильным содержанием кристаллической серы желто-зеленого цвета – *серные бугры*. Когда-то здесь интенсивно выходили парогазовые струи с сероводородом. Кое-где они встречаются и сейчас, образуя своеобразные башенки и натеки серы желтовато-белого цвета. Обнаженная, лишенная растительности поверхность в центре поля испещрена массой крупных и мелких воронок, блюдцеобразных грифонов, грязевых котлов. Особо выделяется громадная парящая поверхность Хлоридного озера, названного так за хлоридно-натриевый состав своих вод.

В западной части Восточного термального поля расположен Нефтяной участок. Если здесь выкопать ямку глубиной 20–30 см, она заполнится горячей водой, на поверхности которой начнут всплывать маслянистые капельки. Нефтяной участок можно найти и по медвежьим следам: считается, что звери избавляются от назойливых паразитов, катаясь по нефтеносной земле.

А вот стайки уток облюбовали не замерзающее зимой теплое озеро Утиное, спрятавшееся под бугром, заросшим высокими и довольно стройными для этих мест березами. Здесь с берега в воду свешиваются вечнозеленые плети кедрового стланика и отражаются в спокойной озерной глади, придавая ей зеленый оттенок и какую-то колдовскую загадочность...

на стр. 103



Вокруг воронок с выходом сероводорода развиваются венчики колоний тионовых бактерий, похожие на космы седовласой фурии

КРАЙ НЕПУГАННЫХ МЕДВЕДЕЙ

Обычно медведи приходят сюда в апреле-мае. В это время повсюду еще лежит снег, а в кальдере уже зеленеет трава – деликатес при весенней бескормице.

Звери с большим достоинством и явным удовольствием разгуливают по теплой узонской земле. Медведицы приносят потомство в январе и весной выводят из берлог «в свет» совсем еще крохотных медвежат, обычно двух или одного. На Узоне они чувствуют себя в полной безопасности.

При приближении человека к семейству самка не спеша уводит детенышей, четко контролируя безопасное расстояние. И горе тому, кто переступит условную линию границы: медведица может счесть ситуацию опасной для детей – а при всей своей видимой неуклюжести этот зверь массой около 400 кг легко развивает скорость до 55 км/ч.

Поэтому приближаться к мирно пасущимся в ягоднике животным не рекомендуется. У фотографов-профессионалов, публикующих снимки медведей, сделанные с очень близкого расстояния, есть свои секреты. Обычно в объектив попадают самцы, всецело занятые рыбной ловлей. При этом фотографа все время страхует сотрудник заповедника с винтовкой. Фотографы-любители действуют на свой страх и риск. Мы встретили семью фотографов, где один вел съемку медведя-самца, а второй держал наготове баллон с отпугивающим газом размером с автомобильный огнетушитель...

Максимальное число медведей, которое нам удалось наблюдать в кальдере Узона, насчитывало 11 особей, включая малышей. Медведица пасет молодежь два года. Потом она отпускает их в «большой мир», и цикл повторяется.

Но бывают и отклонения от правила: в 2008 г. мы встретили на Узоне знакомого молодого мишку, живущего там уже третий год и получившего за свой неопрятный вид и нрав кличку Поганец. Медведицы его тоже не очень уважают и при случае дают мощные оплеухи. Поганец удирает от разгневанных мамаш прямо по термальным полям, не обращая внимание на горячие лужи.

Вообще камчатские медведи очень миролюбивы. Что и неудивительно: в местном животном мире они самые сильные, и естественных врагов у них нет. Опасность для человека таит лишь неожиданная встреча с животными. Медведи могут расценить это как покушение на их территорию или помеху для своих занятий – рыбной ловли или послеобеденного отдыха. Поэтому, передвигаясь в высоком кедровом стланике, лучше заранее выдать себя шумом, свистом или песней.

Медведи, пасущиеся в разноцветной голубично-бруснично-шикшевой тундре, стали неотъемлемой частью пейзажа кальдеры. Люди стараются не тревожить их, и они отвечают снисходительным равнодушием, как и подобает подлинным хозяевам Узона.



Поганец получил свою кличку за неопрятный вид и вредный нрав – привычку подкрадываться к людям, периодические кражи и попытки разломать домики стационара





Грязевые вулканчики поразительно похожи на настоящие. Они поыхивают паром из кратеров и периодически изливают глинистую «лаву». На этих природных моделях имеются даже побочные кратеры и радиальные трещины.

«Лаву» вулканчиков представляет собой каолиновые глины, образовавшиеся из пеплово-пемзовых туфов под воздействием серных паров и горячей воды. Сильным ударом можно пробить тонкий верхний покров – под ним пустоты, на дне которых кипит глина. Такие места очень опасны

Жизнь в кипятке

Вопрос о происхождении жизни и ее дальнейшей эволюции на Земле не теряет своей актуальности в научной среде.

Как известно, наша планета на ранних стадиях развития представляла собой огненный, постепенно охлаждающийся объект. Учитывая потенциальное «бессмертие» первых обитателей Земли – микроорганизмов, размножающихся простым делением, не вызывает сомнения предположение, что изучение этих «живых ископаемых» может открыть новые грани развития жизни. Такими ископаемыми, безусловно, являются ныне здравствующие *термофильные бактерии* и *археобактерии* – живая память о горячем прошлом нашей планеты.

Нужно заметить, что явление термофилии присуще исключительно низшим одноклеточным организмам. Причем если в какой-либо систематической группе мы обнаруживаем термофильный вид, то с большой вероятностью он оказывается наиболее близким к «прародителям». Камчатка и одна из ее жемчужин – кальдера Узона – уникальное место для проведения подобных исследований.

Горячие, насыщенные вулканическими газами воды источников – местообитание целого ряда специфических микроорганизмов. Нужно сказать, что в зависимости от условий внешней среды микроорганизмы способны впадать в состояние, подобное анабиозу, причем их жизнедеятельность может затухать на сотни тысяч и даже миллионы лет! Эти невесомые создания могут переноситься ветром на любые расстояния. В результате появления новых или возвращение к старым условиям приводят к бурному росту микробных сообществ. Так, выброшенный вулканами пепел стерилил лишь в течение короткого периода после извержения: единичные микробы обнаруживаются в нем уже после первого дождя!

Благодаря использованию специально разработанных в Институте химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН олигонуклеотидных зондов, позволяющих оценить «родство» бактерий по гену их рибосомного белка (16S рРНК), удается быстро проводить оценку разнообразия микроорганизмов, не прибегая к традиционному культивированию. Кроме того, с помощью схожих методик можно идентифицировать организмы, обладающие новыми важными свойствами, – например, способностью продуцировать термостабильные ферменты, которые сегодня широко используются в биотехнологических целях.

Анализ микроорганизмов, ежегодно собираемых на Узоне, выявил по меньшей мере две тенденции. Во-первых, термофильные микробные сообщества кальдеры меняются в зависимости от изменения внешней

среды; постоянно обнаруживаются все новые и новые таксоны. Во-вторых, существует определенный набор даже не организмов, а реликтовых генов систем, которые постоянно циркулируют в этих специфических условиях, обнаруживаясь то у одного, то у другого бактериального штамма.

И запах серы...

При первом знакомстве с кальдерой Узона поражает специфический запах сероводорода, иногда настолько сильный, что некоторые путешественники на несколько суток лишаются сна. Узон – великолепный полигон для исследований круговорота серы как необходимого элемента живой материи.

Сера обладает переменной валентностью, поэтому может образовывать широкий спектр самых разнообразных соединений. Циклические превращения серы происходят в основном благодаря окислительным и восстановительным реакциям. Но если первые могут протекать чисто «химическим» путем, то вторые – преимущественно с участием бактерий. В систематическом отношении группа *бесцветных серных бактерий*, объединенная по физиологическим признакам, весьма разнообразна, и далеко не все из описанных ныне видов и даже родов можно считать твердо установленными.

В последние десятилетия природный цикл серы подвергается усиливающемуся антропогенному воздействию, что приводит к накоплению токсичных соединений серы и нарушению ее природного баланса. И серные бактерии представляют собой не только бесценный по значимости объект эволюционных исследований, но и единственный фактор, способный обеспечить замкнутость цикла этого важнейшего химического элемента.

Серных бактерий на Узоне много: хотя сами бактерии малы, их массовые скопления в виде пленок и косм хорошо видны в прозрачной воде горячих ручьев.



Серебристые «русалочки» пряди – массовые скопления бесцветных серных бактерий



Микроклимат кальдеры благоприятен для развития не только микроорганизмов, но и растительности



В горячих источниках кальдеры широко распространены и *циано-бактерии* – первые фотосинтезирующие организмы на планете. Эти низшие одноклеточные организмы, которые не совсем точно называют сине-зелеными водорослями, как и высшие растения, на свету продуцируют кислород. На Узоне они покрывают тонкими пленками поверхность термальных источников, являясь своеобразными фильтрами, не пропускающими в атмосферу некоторые газы (например, метан и углекислоту).

Сегодня в кальдере вулкана Узон выделено девять эталонных площадок для изучения биоразнообразия его микроскопических обитателей. Исследователи надеются найти здесь не только новые бактерии – «помощников» человечества, но и свидетельства древнейших этапов зарождения и эволюции земной жизни.

Ведь стоит ступить на горячую землю остывающего вулкана и увидеть мощные столбы пара от горячих источников и гейзеров, клопочущие грязевые котлы, насыщенные минералами разноцветные ручьи среди яркого пестроцветия изверженных пород – и веришь, что именно такой была наша планета в самом начале начал.

Литература

Власов В.В. *Фонтаны Затерянного мира* // *Наука из первых рук*. – 2007. – № 1. – С. 118–123.

Власов В.В., Репин В.Е. *Репортаж из Долины Смерти* // *Наука из первых рук*. – 2009. – № 2. – С. 76–89.

Репин В.Е., Дейнека Е.В., Симонов А.Н., Пестунова О.П., Колчанов Н.А., Власов В.В., Прокопкин И.Г. *Путешествие в горячую точку* // *Наука из первых рук*. – 2007. – № 1. – С. 98–117.

Репин В.Е., Власов В.В. *Путешествие в невидимый мир* // *Наука из первых рук*. – 2007. – № 4. – С. 56–69.

Экспедиция частично финансировалась по проектам Президиума СО РАН

Авторы благодарят руководство Кроноцкого государственного биосферного заповедника и лично Т.И. Шпиленка за помощь в решении административных и организационных вопросов



Ю. Я. ЛАТЫПОВ

ПОДНОГОТНАЯ КОРАЛЛОВОГО РИФА

ФОТОРЕПОРТАЖ Ю. Я. ЛАТЫПОВА



Коралловый риф... Сами эти слова звучат как шум прибоя, как пение соленого ветра в растрепанных пальмовых кронах далеких сказочных островов. Рифы недаром являются настоящим магнитом для аквалангистов и любителей природы: эта сложно устроенная экосистема уникальна по разнообразию и обилию самых разных морских организмов. Удивительно, но базисом для этого буйства жизни служат крошечные, достаточно просто устроенные животные, практически всю свою жизнь проводящие прикрепленными к субстрату, как обычные растения

Пластинчатые и ветвистые колонии кораллов р. *Acropora* (фото вверху) – обычные обитатели благополучных рифов

Коралловые полипы массивной колонии р. *Favia*



ЛАТЫПОВ Юрий Яковлевич – доктор биологических наук, заместитель директора по науке Дальневосточного морского государственного природно-биосферного заповедника (Владивосток). Более тридцати лет занимается изучением коралловых рифов Тихого и Индийского океанов. Увлекается подводной фотосъемкой

Согласно строгому научному определению «коралловый риф – это локализованная мелководная устойчивая к волнам структура, построенная секретирующими известь организмами, залегающая на подстилающих образованиях, от которых она ясно отличима» (Goreau et al., 1972). Иначе – подводные или надводные известковые гряды, формирующиеся преимущественно скелетами мелких колониальных животных (кораллов) в мелководных участках тропических морей.

Эти удивительные геологические структуры, созданные живыми организмами, образуют широкий пояс в тропической зоне Мирового океана. Географически она ограничивается тропиком Рака и тропиком Козерога с обеих сторон от экватора (между 23,5° северной и южной широты). Сложные известково-каменные структуры в изобилии предоставляют другим организмам «стол и кров», что служит краеугольным камнем богатства и стабильности этого уникального природного сообщества.

Что касается масштабов «градостроительской» деятельности кораллов, то объем среднего по размерам атолла составляет 500 куб. км, что в 15 тыс. раз больше объема пирамиды Хеопса или в 250 раз – всех зданий Нью-Йорка.

Столь впечатляющие сооружения и их крошечные строители, безусловно, заслуживают более близкого знакомства.

Все рифы имеют одинаковую морфологическую зональность:

ЛАГУНА – замкнутая и/или вытянутая вдоль берега ложбина глубиной 2—10 м. Благодаря хорошему освещению здесь формируются заросли водорослей и морских трав. Большое количество пищи и убежищ привлекают сюда многочисленных иглокожих, моллюсков, ракообразных и армию различных червей и бактерий

РИФФЛЕТ, или РИФОВАЯ ПЛАТФОРМА – плато шириной от 20 до многих сотен метров, располагающееся на глубине от нескольких сантиметров до нескольких метров. Большая его часть может осушаться при отливе. Благодаря постоянной смене водных масс из-за приливно-отливных и ветровых волнений и сильной освещенности здесь доминируют, как правило, только один или два хорошо адаптированных вида кораллов, зачастую покрывающих почти всю поверхность твердого субстрата

ГРЕБЕНЬ РИФА, или ЗОНА ВОЛНОЛОМА, занимающий фронтальный край рифа, принимает на себя всю силу и ярость океанических волн. Он формируется колониями крепких кораллов и кораллиновыми водорослями, способными противостоять мощному воздействию прибоя. Защищенные от волн и хищников лабиринтообразные каверны гребня рифа населяют маленькие крабы, креветки, гастроподы и другие животные

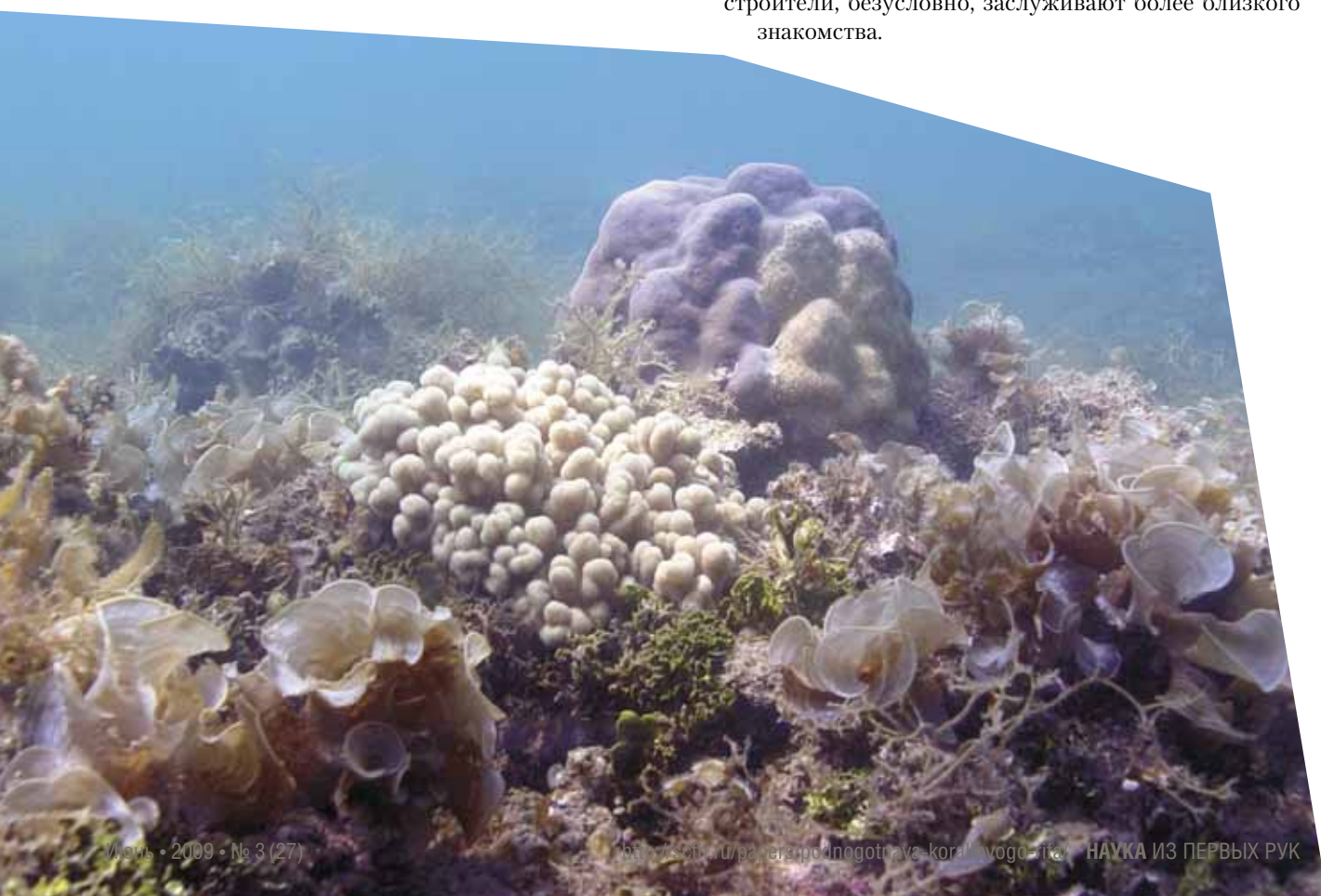
СКЛОН РИФА – наиболее богатая и глубокая часть рифа, предоставляющая своим многочисленным обитателям самые разнообразные экологические ниши и условия жизни.

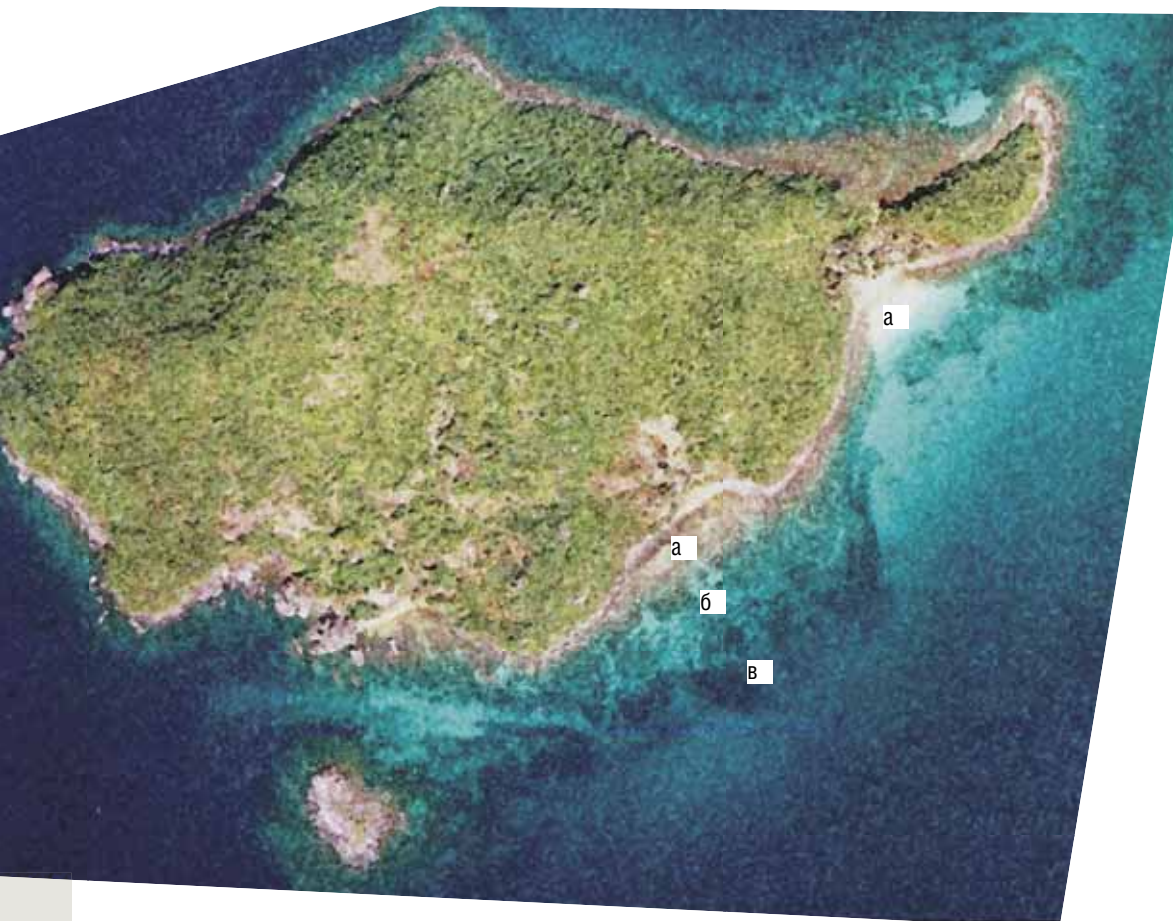
Склон рифа более сложен в морфологическом отношении, чем остальные зоны. Многочисленные кораллы и инкрустирующие морские водоросли процветают в этой зоне ломающихся волн, интенсивного солнечного света и обильного кислорода. Вдоль и поперек склона снуют стаи небольших рыб, а более крупные, включая акул, скатов, барракуд и тунцов, патрулируют между гребнями и ложбинами в поисках добычи



Лагуна (фото слева) и склон кораллового рифа (фото вверх) – наиболее богатые жизнью участки этого уникального тропического морского биоценоза

Все фотографии сделаны автором при исследованиях коралловых рифов Вьетнама





Со времен Чарльза Дарвина все коралловые рифы делят на три основные группы. **ПРИМЫКАЮЩИЕ РИФЫ** расположены в непосредственной близости к материковой или островной суши или отделены от нее узким водным пространством. **БАРЬЕРНЫЕ РИФЫ** вытянуты вдоль края суши и отделены от нее лагуной, ширина которой может достигать нескольких километров. **АТОЛЛЫ** представляют собой крупные коралловые постройки кольцевой формы. Они формируются вокруг островов, когда те опускаются ниже уровня моря. В центре атоллов может образоваться несколько лагун

Схема образования атолла по Ч. Дарвину: при погружении гор риф продолжает расти, становясь из примыкающего (1) барьерным (2), а затем и атоллom (3). На космическом снимке – типичный примыкающий риф (Сиамский залив, Вьетнам): а – лагуна; б – риффлет; в – склон рифа.
По: (Латыпов, 2007)

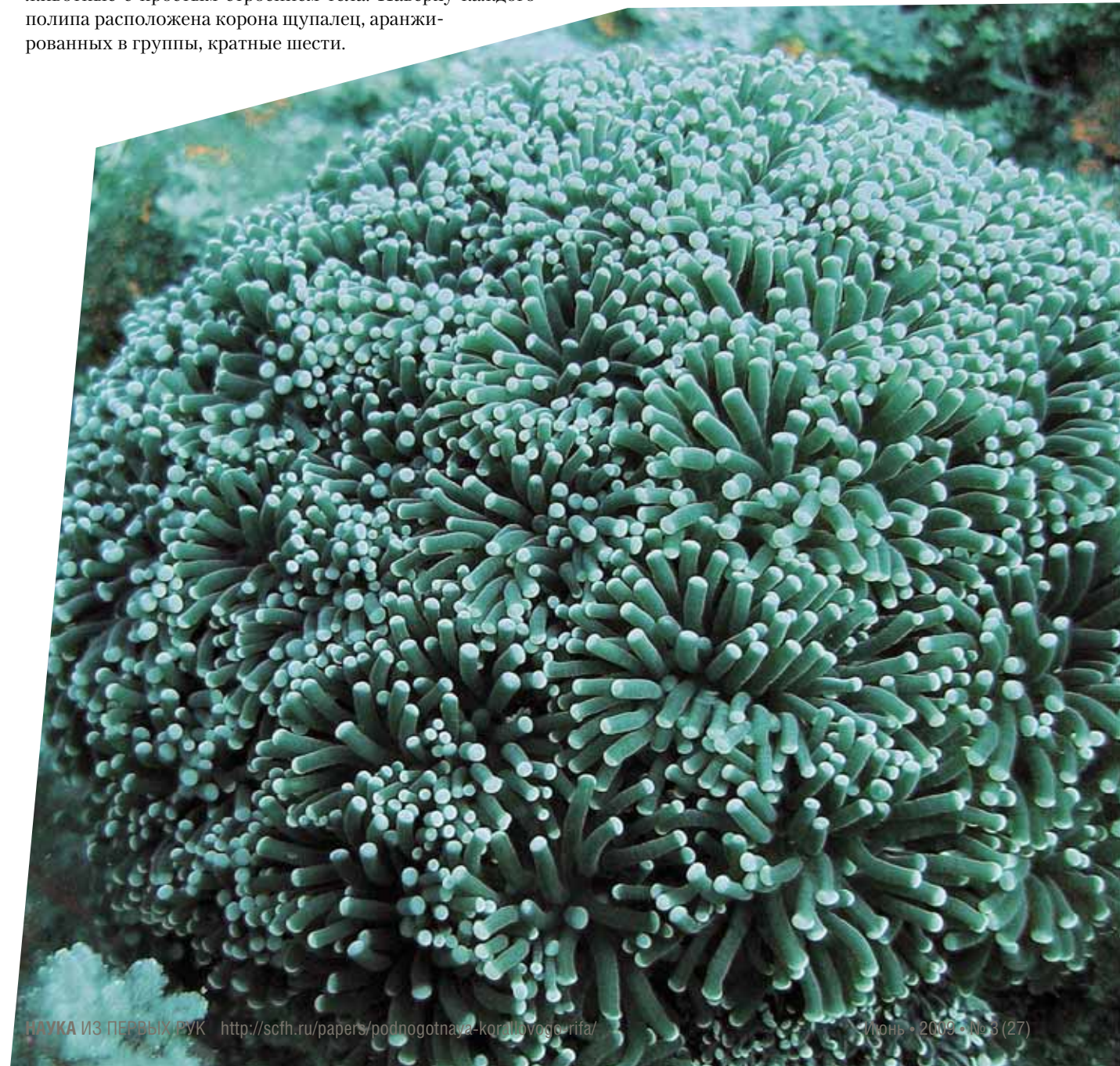
То ли флора, то ли фауна

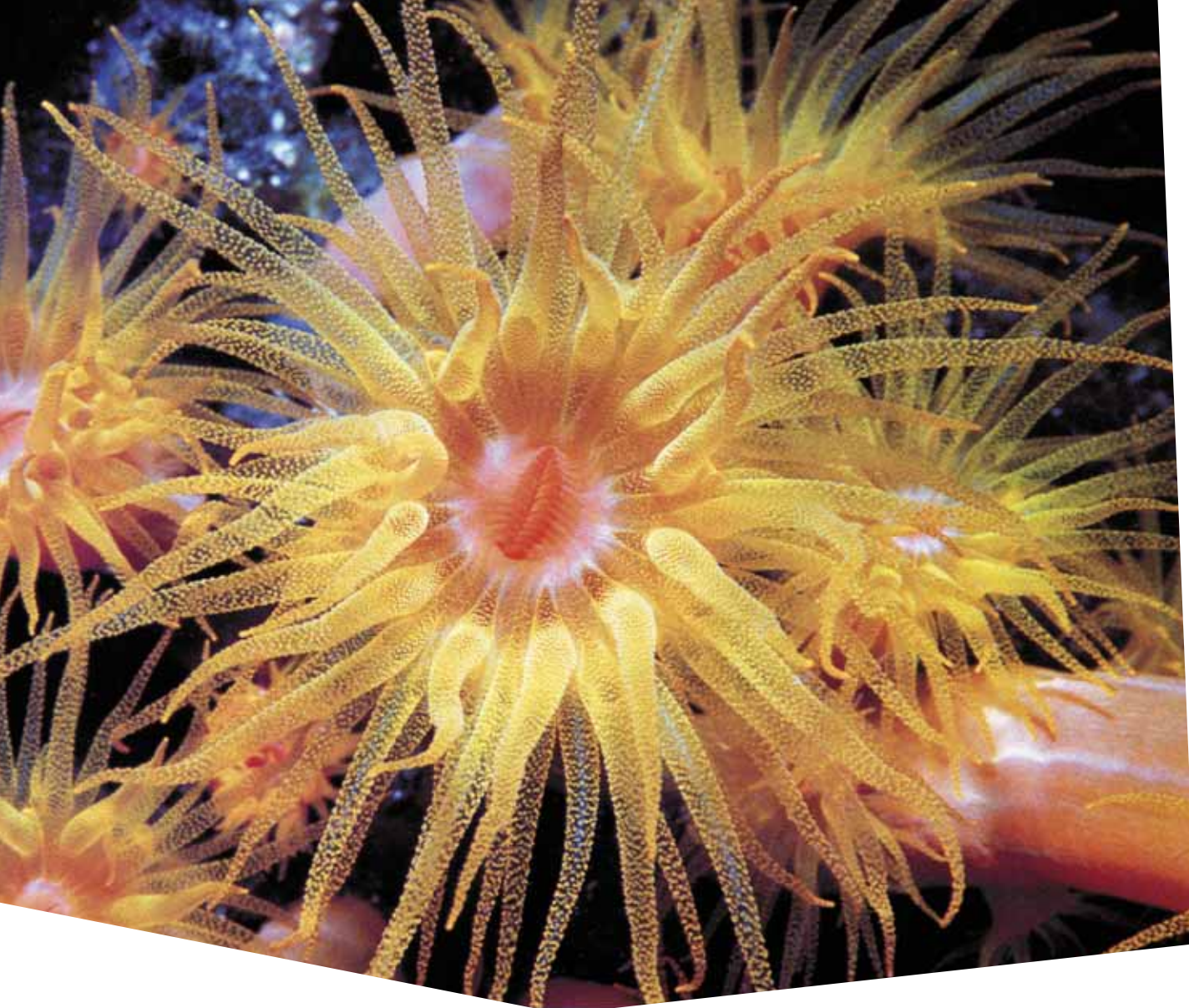
Кораллы, а точнее *коралловые полипы*, относятся к кишечнополостным животным. Не вдаваясь в тонкости систематики, отметим, что все кораллы вместе с медузами и актиниями относятся к типу Cnidaria (стрекающие). Как следует из названия, все эти группы животных имеют ядовитые стрекательные клетки.

Сам класс коралловых полипов (Anthozoa) делится на два подкласса: Hexacorallia (шестилучевые) и Octocorallia (восьмилучевые). Кораллов – обитателей рифов немало, но основными рифостроителями являются шестилучевые *склерактинии*, образующие массивный скелет из карбоната кальция.

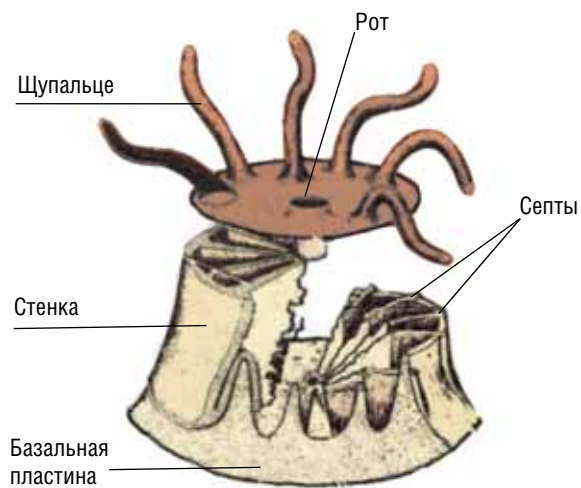
Рифостроящие коралловые полипы – примитивные колониальные животные с простым строением тела. Наверху каждого полипа расположена корона щупалец, аранжированных в группы, кратные шести.

Кораллы р. *Euphyllia* приспособились к обитанию в полусумеречных условиях на глубинах более 20 м. Их ловчие щупальца расправлены круглые сутки, в отличие от всех остальных кораллов, активных только ночью





Внешне коралловый полип р. *Dendrophyllia* больше всего напоминает экзотический цветок



Кораллы являются довольно просто устроенными беспозвоночными, хотя и скелетообразующими, животными. В верхней части полипа в середине щупальца находится рот – единственное отверстие, связывающее животное с внешней средой. Узкий канал от него ведет к большой полости, где на поверхностях специализированных нитей происходит переваривание проглоченной добычи. Скелет полипа – кораллит – состоит из стенок и базальной пластины (подошвы), от которой отходят вверх поддерживающие перегородки (септы). У живого полипа скелет покрыт слоем ярко окрашенных мягких тканей



Известковый скелет небольшой колонии коралловых полипов. Масштаб линейки — 1 см

Именно щупальца и придают им сходство с цветком, которое так смущало натуралистов до XVIII в. и продолжает обманывать некоторых современных ныряльщиков, полагающих, что кораллы – это растения.

Однако животная природа этих столь невинно выглядящих организмов становится очевидной, когда вы застаете их за охотой, ловящих щупальцами добычу и парализующих ее ядовитым секретом своих стрекательных клеток.

Новые полипы отпочковываются от зрелых материнских организмов, в результате чего колония разрастается подобно ветвям дерева. Но кораллы не ограничиваются только бесполом размножением. В одну из летних лунных ночей все особи одновременно выбрасывают в воду яйца и сперму.

Образующиеся после оплодотворения крошечные свободноплавающие личинки совсем не похожи на своих «родителей». Но век их свободы недолог: личинка прикрепляется к подходящему субстрату и начинает формировать известковый скелет и все органы, необ-

ходимые для жизни особи. И если повезет, она станет родоначальником новой колонии...

Размеры взрослого полипа составляют в среднем от 1 мм до 3–4 см. И такие мелкие животные формируют колонии размером от нескольких сантиметров до 5–6, а иногда и 9 метров!

Многочисленные поселения этих крошечных существ и создают в конце концов риф – одно из самых грандиозных и удивительных сооружений живой природы. При этом основная жизнь кораллов сосредоточена лишь на поверхности рифов, где находятся живые полипы, а ниже располагается толща известняка – скелетные останки бесчисленных отмерших особей предшествующих поколений.

Как и другие кишечноротовые животные – гидры, медузы и актинии – кораллы вооружены располагающимися на щупальцах стрекательными клетками, которые служат для нападения и защиты



Колония *Acropora robusta* в виде оленьих рогов (фото слева) и холмистая колония *Acropora monticulosa* (фото справа)



Массивная колония коралла-мозговика *Symphyllia recta* (фото внизу справа)



По своему внешнему виду колонии коралловых полипов-рифостроителей разительно отличаются. Здесь и «оленьи рога», и выставленные вверх «пальцы»; «воронки», плоские «таблички», гладкие «сферы»...

Главными рифостроителями на подавляющем большинстве рифов служат представители шестилучевых кораллов. Для колоний кораллов р. *Acropora*, определяющих видовое разнообразие коралловых сообществ, наиболее характерны ветвистые и пластинчатые формы.

Богатством своих красок риф во многом обязан практически повсеместно распространенным колониям кораллов *Pocillopora* и *Stylophora*. Палитра их расцветок необычайно широка – от нежных палевых до ярких красных тонов.

Во всех зонах рифов можно встретить и колонии карваеобразных кораллов, обычно отличающихся кораллитами крупных размеров. Среди них привлекают внимание своей необычной формой так называемые кораллы-мозговики

Цветущий нежно-голубыми «цветами» куст – колония *Stylophora pistilata*



Экспериментальная установка для выращивания кораллов на склоне рифа о-ва Мун (зал. Нячанг, Вьетнам)

Друг-водоросль

По большому счету сходство с растениями у рифообразующих кораллов неслучайно. Дело в том, что они могут жить только в тесном симбиозе с одноклеточными водорослями *зооксантеллами*.

Водоросли, живущие непосредственно в тканях самого коралла, обладают высокой фотосинтетической активностью. При этом «домовладелец» потребляет около 60% синтезированных водорослями питательных веществ (сахаров, глицерина и аминокислот), а также выделяемый ими дефицитный в тропических водах кислород. Но «квартиранты» тоже не остаются внакладе: они используют продукты выделения кораллов – двуокись углерода, азот и фосфор.

Зооксантеллы быстро и непрерывно изымают из тканей коралла углекислый газ. В результате из-за его недостатка в метаболизме коралла происходит сдвиг в сторону образования нерастворимого карбоната кальция (CaCO_3) – основного



1



2



3



4

СТРОИМ КОРАЛЛОВЫЙ РИФ

Кораллы уязвимы. Рифы постоянно повреждаются в результате деятельности хищников, ураганов, отложений осадочного материала, сброса отработанных вод и растворенных в воде удобрений и т. д. Колониальные коралловые полипы, как и все кишечнополостные, способны к регенерации, причем умеют восстанавливать не только поврежденные части организма, но даже саму колонию. Поэтому естественное восстановление – один из возможных подходов к регенерации рифовой экосистемы. Однако процесс этот может даже при благоприятных условиях занимать до нескольких десятков лет, причем новые коралловые поселения часто отличаются низким видоразнообразием.

Для восстановления рифов можно трансплантировать целые колонии кораллов в районы максимальных разрушений, где твердый субстрат еще доступен. Эффективность такого подхода увеличивается, если использовать колонии, готовые к выбросу половых гамет. Ограничения метода в том, что необходимо изымать достаточно большое количество трансплантатов, не повреждая при этом донорский участок рифа.

Наиболее практически выполнимой является трансплантация фрагментов коралловых колоний. При благоприятных условиях эти фрагменты могут выжить, снова прикрепиться к субстрату и восстановиться до первоначальной формы колонии, а затем начать воспроизводиться половым путем.

На одном из рифов зал. Нячанг по предложению и при финансовой поддержке вьетнамских ученых были проведены успешные эксперименты по выращиванию кораллов из фрагментов (Латыпов, 2006). Полученные данные могут быть использованы непосредственно при восстановлении естественных поселений кораллов либо при выращивании кораллов для удовлетворения потребностей рынка, что позволило бы уменьшить антропогенный пресс на рифы.

Фрагменты коралловых колоний *Acropora formosa* (1), размещенные на экспериментальной установке, успешно росли в течение года, образуя новые ответвления: 2 – в день пересадки; 3 – спустя 8 месяцев после пересадки; 4 – спустя 12 месяцев

материала скелета и, соответственно, каркаса рифа. Благодаря жизнедеятельности водорослей скорость роста скелета у рифообразующих кораллов в 10 раз больше, чем у нерифообразующих.

Кораллы зависят от водорослей, водоросли, в свою очередь, – от количества проникающего в водную толщу света. Поэтому строители рифов могут успешно жить на глубинах не более 70–80 м (большой частью – около 40 м) в зависимости от прозрачности воды. К тому же по неизвестным пока причинам (вероятно, связанным с физиологией образования известкового скелета) коралловые рифы формируются при температуре воды не ниже 18°C.

Таким образом, коралловые рифы представляют собой явление, характерное лишь для мелководья тропических морей.



Эти безыгольчатые родственники морских ежей обитают на коралловых рифах с древнейших времен. Голотурия, или морской огурец (фото вверху), и морская лилия (фото внизу)



Разнообразие форм колоний коралловых полипов поражает даже самое богатое воображение. И на этом чудеса не кончаются: вокруг колоний кораллов, меж их ветвей и даже внутри скелета живут тысячи удивительнейших обитателей: от микроскопических водорослей и бактерий до беспозвоночных и рыб.

Поселения многих кораллов представляют собой картины столь необычной красоты, что им позавидовали бы художники-импрессионисты. Погружение в сказочный мир тропического мелководья не оставляет никого равнодушным, вызывая тот восторг и благоговейный трепет перед таинством жизни, которые нам дано испытать лишь в детстве. И если вам посчастливится хоть раз побывать в этом морском Эдеме, вас будет тянуть туда вновь и вновь...

К сожалению, около трети коралловых рифов сегодня находятся в критическом состоянии, и всего 40% считаются устойчивыми. В ближайшем будущем главная угроза рифам будет исходить от человеческой деятельности местного или регионального масштаба. И эта опасность, вероятно, намного больше, чем ожидаемое повышение уровня Мирового океана в результате глобального потепления, угрожающее кораллам в отдаленном будущем. Ведь нежная и такая хрупкая красота рифов расцветает только в самых чистых, теплых и пронизанных солнцем морских водах.

Чрезвычайно богатые жизнью, коралловые рифы являются уникальными морскими зоопарками, созданными самой природой

Литература

Латыпов Ю.Я. Коралловый риф. Природа, богатство, красота. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2008. – 116 с.

Латыпов Ю.Я. Трансплантация и выращивание фрагментов колоний различных видов склерактиний на рифе Вьетнама // Биол. моря. – 2006. – Т. 32. – С. 436–442.

Наумов Д.В., Протт М.В., Рыбаков С.Н. Мир кораллов. – М.: Гидрометеоиздат, 1985. – 360 с.

Познавательный журнал для хороших людей

НАУКА

из первых рук

3 3⁽²⁷⁾ 2009

НАУКА из ПЕРВЫХ РУК

№ 3 (27) 2009

ВИРУС ЗАПАДНОГО
НИЛА: КРУГОСВЕТКА

КАК ЧИТАЮТ ГЕНЫ

МНОГОГОЛОСЫЙ
ШЕПОТ УЗОНА

АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
ТРАНСПОРТ БУДУЩЕГО

ISSN 18-10-3960



9 771810 396003 27

ЯДЕРНАЯ ТОПКА ЗЕМЛИ



Этот молодой камчатский медведь получил свою кличку Поганец за неприятный вид и вредный нрав – привычку подкрадываться к людям, периодические кражи и попытки разломать домики исследовательского стационара. Медведицы его тоже не очень уважают и при случае дают мощные оплеухи. Поганец удирает от разгневанных мамаш прямо по термальным полям, не обращая внимание на горячие лужи.
Камчатка. Кальдера Узона. Фото В. В. Власова