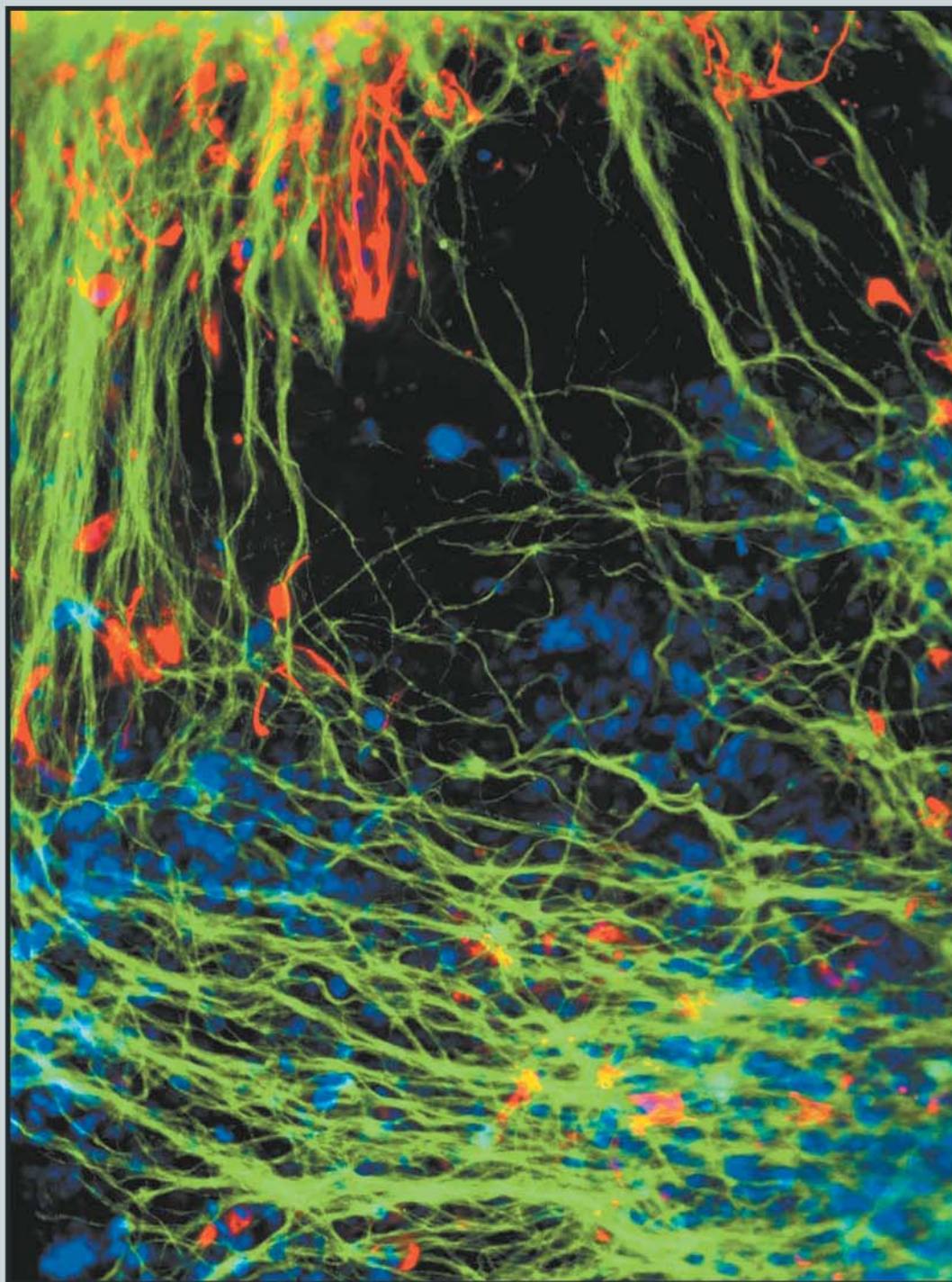


ПРИРОДА

5 10



В НОМЕРЕ:**3 Киселев С.Л., Шутова М.В.**
Репрограммирование клеток: прыжок вверх по лестнице, ведущей вниз

Четыре года назад в руках ученых оказался «философский камень» — технология, позволяющая возвращать взрослые клетки в эмбриональное состояние. В чем суть этой технологии и каковы ее перспективы для фундаментальной науки и практической медицины?

11 Кривовичев С.В.
Уран в нанотрубке

Нанотехнологический бум уже достиг химии урана и трансурановых элементов — обнаружены первые уранил-селенатные комплексы в виде наноразмерных трубок.

18 Шикин А.М., Радер О.
Квантовые состояния как посредники в магнитном взаимодействии

В слоистых магнитных металлических системах наблюдаются интересные эффекты модуляции магнитных свойств в зависимости от толщины немагнитного слоя. Причиной служат квантование электронных состояний и их спиновая поляризация.

27 Дедыш С.Н., Куличевская И.С.
Планктомицеты: загадочные красавцы из мира бактерий

За последние годы знания о разнообразии, метаболических типах и экологических функциях планктомицетов существенно расширились. Однако по сравнению с другими бактериями эта удивительная группа микроорганизмов остается еще слабо изученной.

36 Лыгина Т.И.
Внутриплитная эндогенная активность в океане — новые факты

Магматическая и постмагматическая деятельность в районе российского лицензионного участка в железомарганцевой провинции Кларифон-Клиппертон оказала существенное влияние на формирование и состав конкреционно-коркового оруденения.

46 Михайлов В.М.
Горные реки равнин и горы с равнинными реками

В некоторых интенсивно воздымающихся и сильно расчлененных горных сооружениях реки неспешно петляют в широкопойменных долинах, выстланных аллювием. В то же время на относительно стабильных плоскогорьях большинство водотоков продолжают вгрызаться в скальные породы.

54 Сапожников М.Н.
Лазерная одиссея Теодора Меймана
Пятьдесят лет назад была впервые получена генерация когерентного света в кристалле рубина. К этому событию приурочен выход на русском языке книги Теодора Меймана, создателя первого рубинового лазера.

Мейман Т.
Лазерная одиссея (56)

О чем писала «Природа»**65 Кольцов Н.К.**
Национальная организация науки**75** **Новости науки**

Еще один класс вспышек сверхновых? (75). Новая космическая линейка. **Вибе Д.З.** (76). Магнитные поверхности (76). Платиновые нанокатализаторы (77). Новая технология массового производства графена (77). Как жабы заселили мир (77). Новый препарат для лечения малярии (78). Освоение железомарганцевых руд океанского дна (78). Ленточные глины на северо-востоке Алтая — признак погребенных россыпей золота (78). Высвобождение метана из мерзлотных толщ арктического шельфа (79). Гигантские рыбы мезозойских морей (80).

Рецензии**81 Сытин А.К.**
Тоталитаризм и орнитология
(на кн.: Е.Новак. Ученые в вихре времени: Воспоминания об орнитологах, защитниках природы и других натуралистах)**86** **Новые книги****88 Семихатова Н.Б.**
Взгляд в прошлое

CONTENTS:

- 3 Kiselev S.L., Shutova M.V.**
**Reprogramming of Cells:
 Upward Jump on a Downward Ladder**
For years ago scientists found a «philosophers' stone» — a technology allowing them to return adult cells into embryonic state. What is the essence of this technology and what are its prospects for fundamental science and practical medicine?

- 11 Krivovichev S.V.**
Uranium in a Nanotube
Boom of nanotechnologies already extended to chemistry of uranium and supertransuranic elements: the first uranyl-selenate complexes in the form of nanotubes were discovered.

- 18 Shikin A.M., Rader O.**
**Quantum States as Intermediates
 in Magnetic Interaction**
Intriguing effects of magnetic properties modulation are observed in layered magnetic metallic systems in dependence on the thickness of non-magnetic layer. They are caused by quantization of electronic states and by their spin polarization.

- 27 Dedysh S.N., Kulichevskaya I.S.**
**Planktomyces: Mysterious Beauties
 from Bacterial Kingdom**
Recently a significant expansion of knowledge about diversity, metabolic types and ecologic functions of planktomyces was achieved. But in comparison to other bacteria this surprising group of microbes is still poorly investigated.

- 36 Lygina T.I.**
**Intraplate Endogenous Activity
 in the Ocean: New Facts**
Abyssal post-abyssal activity in the Russian licence site in ferromanganese province Clarion-Clippertone fracture zone has material effect on formation and composition of concretionary and crust mineralization.

- 46 Mikhailov V.M.**
**Mountainous Rivers of Plains
 and Mountains with Lowland Rivers**
In some swiftly rising and highly dissected mountains, rivers are winding unburiedly in wide valleys paved with alluvium. At the same time, on virtually immobile plateaus most of the watercourses are still gnawing at bedrock.

- 54 Sapozhnikov M.N.**
The Laser Odyssey of Theodore Maiman
Fifty years ago a generation of coherent light in ruby crystal was achieved for the first time. This event was commemorated by publishing a Russian translation of a book by Theodore Maiman, the creator of the first ruby laser.

Maiman T.
The Laser Odyssey (56)

What «Priroda» Wrote About

- 65 Koltzov N.K.**
Nation-Wide Organization of Science

- 75 Science News**
 Another Type of Supernova Bursts? (75). New Cosmic Scale. **Wiebe D.Z.** (76). Magnetic Surfaces (76). Platinum Nanoparticle Catalysts (77). New Technology of Graphen Mass Production (77). How Toads Colonized the World (77). New Drug for Malaria Treatment (78). Mining of Ferrimanganese Ores on the Ocean Bottom (78). Ribbon Clays at North-East Altai — A Sign of a Buried Alluvial Gold (78). Methane Emission from Arctic Shelf Permafrost (79). Gigantic Fishes of Mesozoic Seas (80).

Book Reviews

- 81 Sytin A.K.**
Totalitarianism and Ornithology
 (on a book: E.Novak. Scientists in Whirlwind of Time. Memoirs about ornithologists, environmentalists and other naturalists)

- 86 New Books**

In the End of Issue

- 88 Semikhatova N.B.**
A Look into the Past

Репрограммирование клеток: прыжок вверх по лестнице, ведущей вниз

С.Л.Киселев, М.В.Шутова

Способность эмбриональных стволовых клеток (ЭСК) превращаться (дифференцироваться) в любые клетки взрослого организма давно привлекает внимание исследователей*. Научившись выделять и культивировать ЭСК в лабораторных условиях, ученые получили уникальную модель для фундаментальных исследований нормального развития организма и различных его патологий, в том числе рака. Весьма заманчива перспектива использования ЭСК и в медицинской практике — трансплантологии, клеточной терапии и т.д. Однако до недавнего времени все многообещающие начинания наталкивались на два главных недостатка ЭСК — трудности при их получении и тканевую несовместимость с организмом пациента.

И вот четыре года назад весь мир облетела сенсационная новость — японские ученые впервые получили из дифференцированных клеток взрослого организма мыши недифференцированные, т.е. функционально сходные с ЭСК. Иными словами, удалось повернуть природную программу развития вспять, заставив взрослые клетки «забыть» свою специализацию

* Подробнее см.: Киселев С.Л., Лагарькова М.А. Эмбриональные стволовые клетки // Природа. 2006. №10. С.49—55.

© Киселев С.Л., Шутова М.В., 2010



Сергей Львович Киселев, доктор биологических наук, заведующий лабораторией генетических основ клеточных технологий Института общей генетики им.Н.И.Вавилова РАН. Область научных интересов — молекулярно-генетические и эпигенетические механизмы функционирования клеток млекопитающих, в том числе опухолевых и эмбриональных стволовых клеток человека. Член редколлегии журнала «Природа».



Мария Владимировна Шутова, аспирант той же лаборатории. Занимается изучением процесса генетического репрограммирования и созданием клеток с индуцированной плюрипотентностью.

и вновь стать универсальными, т.е. способными к превращению в любую клетку организма. Вскоре аналогичные результаты принесли опыты и с культурами клеток человека.

Естественно, достижения в новой области науки вдохновили множество ученых. Недаром на обложку декабрьского номера 2008 г. журнала «Science» были вынесены слова «Прорыв года — репрограммирование кле-

ток» на фоне рисунка разветвленного USB-кабеля, передающего генетическую информацию клеткам.

В последующие годы исследования генетического репрограммирования клеток стали напоминать марафон, при этом количество публикаций увеличивается, как снежный ком. Одни ученые пытаются понять молекулярные механизмы процесса, другие — сосредоточены на

повышении его эффективности. В чем же суть новой технологии? Чем она отличается от прочих? Какие у нее недостатки и какие перспективы?

Тоти-, плюри- и мультипотентность

Организм млекопитающего животного состоит из сложного набора взаимосвязанных тканей и клеток. Все они произошли от одной единственной клетки — оплодотворенной яйцеклетки, или зиготы. Она универсальна, точнее, тотипотентна (от лат. *totus* — весь, целый, совокупный и *potentia* — сила, мощь, возможность), а вот ее «потомки» постепенно теряют эту способность и становятся специализированными. Однако в ранний период развития — на стадии бластоцисты (для человека это 3–5-й день после оплодотворения яйцеклетки) клетки ее внутренней массы все еще могут дифференцироваться, т.е. плюрипотентны (от лат. *plurialis* — множественный, и *potentia*). Именно из внутренней клеточной массы бластоцисты

в дальнейшем будет развиваться организм со всеми его тканями и органами.

Как ни странно, стволовые клетки существуют не только в эмбриональный период развития — они сохраняются и в некоторых тканях зрелого организма. Правда, их возможности ограничены: они мультипотентны, т.е. способны создавать клетки-производные лишь одного зародышевого листка или даже одной ткани. Их главная задача — обеспечивать постоянную смену клеток при их физиологической смерти или повреждении.

Все остальные «взрослые» клетки узкоспециализированы и не могут в условиях организма сменить свою функцию. К примеру, лимфоцит крови не может стать β -клеткой поджелудочной железы и начать регулируемое организмом производство инсулина, хотя и та, и другая клетка, как, впрочем, и все тоти-, плюри- и мультипотентные клетки, несут один и тот же набор генетической информации. Так почему же не все они способны к превращениям и так ли однонаправлен этот путь?

Эпигенетический «ландшафт»

Дело в том, что клеточные программы реализуются на двух уровнях — генетическом и эпигенетическом. Иными словами, конечная форма развившегося организма зависит не только от реализации генетической программы, но и от того, какие сигналы получают гены от внешней среды в процессе развития. Благодаря этим сигналам клетка «выбирает» свой путь дифференцировки, что дает все разнообразие клеток и тканей взрослого организма.

Влияние эпигенетики на путь развития клетки очень разнообразно описал выдающийся британский биолог Конрад Уоддингтон (1905–1975). Согласно его теории «эпигенетичес-

кого ландшафта», существует однозначный путь вниз по большому «долинам», но, поскольку «ландшафт» находится в постоянном движении, делящиеся клетки могут на определенном этапе выбрать альтернативные пути, которые также приведут к конечному, но другому фенотипу.

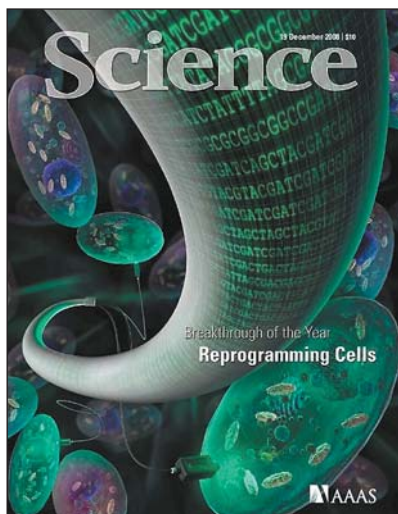
В настоящее время в молекулярной биологии под «эпигенетическим ландшафтом» понимают модификации белков хроматина и ДНК. Они не изменяют геном клетки, но могут контролировать работу генов. Такой двойной контроль развития нужен для предотвращения случайных переходов и, как следствие, злокачественной трансформации клетки.

Одна из начальных точек выбора — плюрипотентные клетки внутренней клеточной массы бластоцисты, из которых получают в лабораторных условиях бессмертные плюрипотентные линии клеток — ЭСК.

Современная наука уже четверть века умеет манипулировать стабильными линиями ЭСК. В 2007 г. за разработку технологии использования ЭСК мыши для создания модельных организмов была вручена Нобелевская премия трем ученым — М.Капеччи, О.Смитису и М.Эвансу*. Они научились получать так называемых нокаутных животных, у которых «выключен» тот или иной выбранный ген. Эта методика позволила изучить работу многих генов, вовлеченных в процесс развития, а также природу разнообразных генетических заболеваний.

ЭСК человека были получены в 1998 г. в лабораториях подобраны такие условия их культивирования, при которых *in vitro* (вне организма) программа дальнейшего развития ЭСК не реализуется и они сохраняют свои плюрипотентные свойства

* Подробнее см.: Киселев С.Л. Лауреаты Нобелевской премии 2007 года по физиологии или медицине — М.Капеччи, О.Смитис, М.Эванс // Природа. 2008. №1. С.78–83.



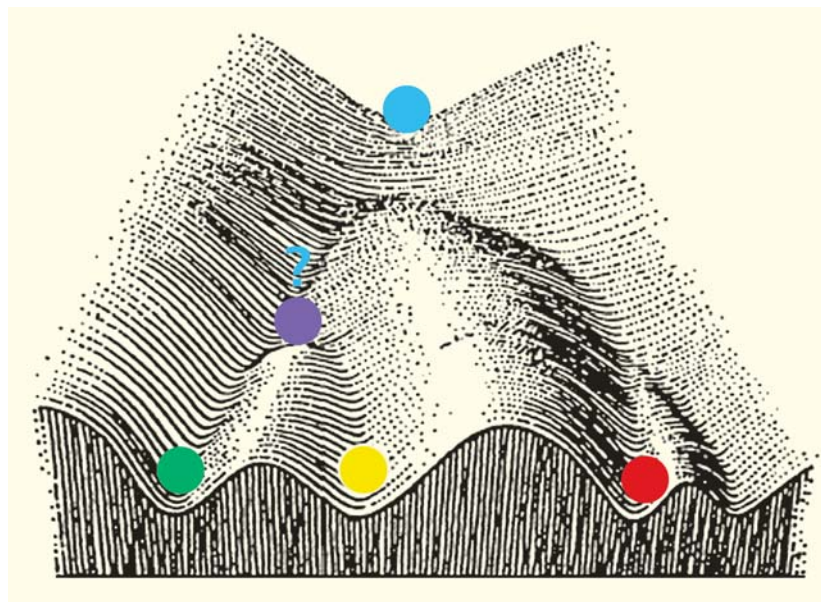
Обложка журнала «Science» (19 декабря 2008 г.). «Прорыв года — репрограммирование клеток» на фоне рисунка разветвленного USB-кабеля, передающего генетическую информацию клеткам.

неограниченное время. Но, опять оказавшись в бластоцисте (т.е. в правильном месте и в правильное время), они могут начать реализовывать программу индивидуального развития, которая в дальнейшем приведет к образованию различных тканей, в том числе и крови, содержащей лимфоциты.

Есть и другой способ получения ЭСК или целого организма — «перенос ядра соматической клетки», или, как это не совсем корректно называется средствами массовой информации, «клонирование». Ядро соматической клетки (например, фибробласта кожи) переносится в ооцит — женскую половую клетку, из которой впоследствии вырастает новый организм. Таким способом была создана в 1998 г. овечка Долли, а в наши дни пытаются получить коров, кошек, собак и т.д. К сожалению, эффективность этой технологии все еще очень низка, а полученные особи не абсолютно идентичны донорам генетического материала и не вполне здоровы.

Применяя эту технологию, можно не идти до конца и остановиться на начальных этапах: получить бластоцисты, а из них выделить плюрипотентные ЭСК. Таким образом уже выделены ЭСК некоторых приматов, но особенно важно было бы получить линии ЭСК человека. Их генетический материал был бы идентичен донору ядра и из них можно было бы дифференцировать ткани, иммунологически совместимые с пациентом. Однако пока все попытки получить таким способом ЭСК человека терпят неудачу.

В 2006 г. появилась принципиально новая идея — не пытаться воссоздать путь развития клетки, а репрограммировать уже взрослые клетки. Раз генетическая информация и в плюрипотентной ЭСК, и во взрослой клетке одинакова, нужно всего лишь заставить клетку подняться вверх по «долине» в эпигенетическом «ландшафте». Как же это можно сделать?



Эпигенетический ландшафт Уоддингтона. Плюрипотентные клетки развивающегося организма (голубой шар) катятся вниз по долинам, огибая горы. Ландшафт влияет на развитие генетической программы в процессе индивидуального развития. Есть хорошо определенными пути вниз по долинам, приводящие к определенным фенотипам (зеленый и желтый шары). Ландшафт динамичен и зависит от внешних факторов, поэтому некоторые пути вниз могут оказаться закрытыми, тогда клетка выберет иной путь, приводящий к другому фенотипу, но при неизменном генотипе.

Индукцированная плюрипотентность

К настоящему времени обнаружено большое количество генов, которые играют важную роль в поддержании уникальных свойств ЭСК. Наибольшее значение имеют гены, кодирующие белки, которые после перемещения в ядро клетки регулируют считывание генетической информации (транскрипцию). Именно гены транскрипционных белков (или транскрипционных факторов, как их именуют специалисты) руководят работой других генов, определяющих функцию клетки. Современные методы генной инженерии позволяют относительно легко вводить в клетку генетический материал, который может выполнять свою функцию (экспрессироваться) вне клеточного контроля. В последнее время широко применяются вирусы, которые с высокой эф-

фективностью инфицируют клетку, внедряют (интегрируют) в ее геном и экспрессируют нужные гены. Даже если какой-то ген в клетке «молчит» (не экспрессируется), то такой же ген, доставленный в нее в составе вируса, будет производить в клетке функциональный белок. Существуют и другие методы доставки генетического материала в клетку, они менее эффективны, но у них есть свои преимущества.

А если попытаться с помощью вирусных конструкций доставить в какую-либо клетку транскрипционные факторы, определяющие плюрипотентность, и заставить их работать?

Именно такой эксперимент решил поставить Шинья Яманака с коллегами в своей лаборатории (Университет Киото, Япония). В терминально дифференцированные клетки мыши (фибробласты кожи) с помощью ретровирусов в различных сочета-

ниях были введены гены 24 транскрипционных факторов [1]. Среди них были и гены, характерные для плюрипотентных клеток, и гены, связанные с контролем разрастания (пролиферации) и развития. Наблюдая за поведением клеток, исследователи обнаружили, что примерно через две недели фибробласты меняют внешний вид (морфологию) и становятся похожи на ЭСК мыши. Измененные клетки, названные iPS-клетками (от англ. **i**nduced **P**luripotency **S**tem cells — стволовые клетки с индуцированной плюрипотентностью), отбирались для молекулярно-генетического анализа. По внешнему виду, свойствам и генетическому портрету они были близки, но не идентичны ЭСК, полученным естественным путем.

Из 24 генов-кандидатов наилучшие результаты дала комбинация генов *Oct3/4*, *Sox2*, *c-Myc* и *Klf4*. Гены *Oct3/4* и *Sox2* кодируют транскрипционные факторы, которые функционируют на ранних стадиях эмбриогенеза, тогда как в клетках взрослого организма они не работают. Вместе они контролируют поддержание плюрипотентного состояния. Ген *c-Myc* тоже кодирует транскрипционный фактор, но, в отличие от двух предыдущих, участвует не в эмбриогенезе, а в контроле клеточного цикла и деления любой клетки. Ген *Klf4* также не имеет определенной временной или тканевой специфичности, он кодирует транскрипционный фактор, который может как активировать, так и останавливать транскрипцию. Он помогает клеткам избежать гибели и в балансе с *c-Myc* контролирует апоптоз. Кроме того выяснилось, что *Klf4* в комплексе с *Oct3/4* и *Sox2* индуцирует работу другого важного гена плюрипотентности — *Nanog*. Если первые два гена весьма специфичны для ранних стадий эмбриогенеза, то два последних играют большую роль в пролиферации клеток и, соответственно, в процессах образования опухолей. Удивительно, но

в этих первоначальных исследованиях остались «за бортом» гены, которые считались необходимыми для свойств ЭСК, например ген *Nanog*.

Конечно, не обошлось и без негативных моментов. Во-первых, использование протоонкогена *c-Myc* потенциально опасно, так как может спровоцировать образование опухолей. Во-вторых, в некоторых клонах с определенного этапа культивирования начинает стремительно нарастать количество клеток с хромосомными перестройками, что свидетельствует о нестабильности генома созданных клеток. В-третьих, если введенные гены не замолкают после репрограммирования, может затрудняться направленная дифференцировка *in vitro*. Кроме того, эффективность получения iPS-клеток пока очень низка [2]. Тем не менее к исследовательской гонке подключился десяток лабораторий. Набор генетических факторов немного менялся, менялась и эффективность получения первичных клеток. Джеймс Томсон, первооткрыватель человеческих ЭСК, получил iPS-клетки из фибробластов человека, используя несколько другую комбинацию генов, которая включала и ген *Nanog* [3]. Оказалось, что этот ген «доводит» клетки, в которых процессы репрограммирования прошли не до конца, до плюрипотентного состояния и таким образом повышает эффективность метода.

Усовершенствованная система отбора iPS-клонов позволила добиться выживания химерных мышей, полученных путем введения iPS-клеток в бластоцисту беременной мыши, и даже наследственной передачи «репрограммированного» генома. В настоящее время уже получены iPS-клетки из десятка специализированных тканей организма мышей, человека и свиней. Кроме эмбриональных и кожных фибробластов, в iPS-клетки были превращены нейрональные предшественники, клетки пече-

ни и эпителия кишечника, кератиноциты, мышечные, гематopoэтические, мезенхимальные стволовые клетки, герминальные и другие клетки [4].

С использованием элегантной системы индуцированной экспрессии генов, но опять-таки с помощью ретровирусов было показано, что даже В-лимфоциты, в которых в процессе развития взрослого организма произошла индивидуальная перестройка генов иммуноглобулинов, способны преобразовываться в iPS-клетки [5]. В процессе индукции плюрипотентного состояния введение в клетку транскрипционных факторов приводило к изменению не только работы генетической программы, но и эпигенетического портрета клеток, которые становились похожи на ЭСК. Самым удивительным оказалось то, что введенные в состав ретровирусов модифицирующие гены через некоторое время прекращали свою работу, претерпевая, как считают исследователи, эпигенетическую модификацию *de novo*. Более того, уже известно, что для индукции плюрипотентности можно использовать генетические конструкции, которые не встраиваются в геном, и даже рекомбинантные белки. Таким образом, не вмешиваясь непосредственно в геном клетки, а только контролируя его работу, исследователи смогли в конце концов вернуть дифференцированные клетки в ЭСК-подобное состояние. Но пока, к сожалению, эффективность таких, «неинвазивных», методов остается довольно низкой.

Последние достижения

За четыре неполных года опубликовано более 600 работ, посвященных получению, изучению и применению клеток с индуцированной плюрипотентностью, из них более 400 — за последние полгода. Обнаружен целый ряд внутриклеточ-

ных факторов, которые влияют на эффективность репрограммирования. Например, снижение уровня белка p53, контролирующего появление опухолевых клеток, существенно увеличивало эффективность индукции плюрипотентного состояния. Однако p53 запускает программу клеточной смерти (например, при нарушениях в работе генома), поэтому, если его ингибировать, можно получить множество клеток с перестройками. Если же выбрать тип клеток, в которых уровень экспрессии некоторых «магических» транскрипционных факторов исходно высок, например нейральные стволовые клетки (в них работают гены *Klf4* и *c-Myc*), достаточно всего лишь повысить уровень гена *Oct3/4*, чтобы они стали плюрипотентными.

Однако усилия исследователей нацелены не только на повышение эффективности метода, но и на понимание, что же про-

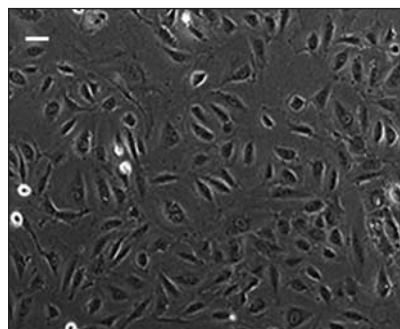
исходит с клеткой при репрограммировании. Получены дополнительные подтверждения тому, что ключевую роль в этом процессе играет ген *Oct3/4*. При подробном сравнении iPS-клеток и ЭСК оказалось, что они очень похожи по своим физиологическим свойствам (по состоянию митохондрий и длине теломера). Даже сигнальные пути, участвующие в поддержании плюрипотентности и дифференцировке, у обоих типов клеток аналогичны. Хотя все полученные на сегодняшний день линии iPS-клеток отличаются от ЭСК по экспрессии ряда генов, до сих пор не удалось найти специфических маркеров репрограммирования. Неутешительно и то, что пока нет единой системы характеристики линий плюрипотентных клеток, поэтому сложно сравнивать свойства даже самых совершенных клонов iPS.

Однако уже сейчас ясно, насколько перспективно примене-

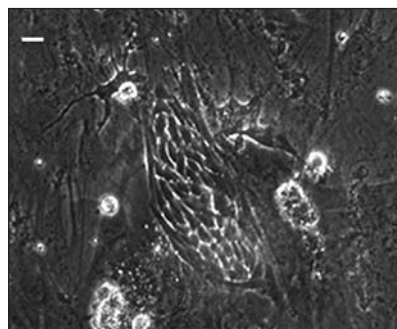
ние пациент-специфических iPS-клеток в медицине. Например, иранские исследователи получили iPS-клетки из фибробластов кожи людей с бомбейским синдромом, при котором генетически нарушен синтез А и В антигенов [6]. У таких людей начинается иммунная реакция при переливании любой другой крови, зато сами они — универсальные доноры, ведь в их крови нет никаких «опознавательных знаков». Клетки кожи носителей бомбейского синдрома были репрограммированы в iPS, а из них получены предшественники клеток крови. Учитывая, что плюрипотентные клетки бессмертны и могут неограниченно долго культивироваться, в руках ученых оказался неисчерпаемый источник клеток крови, универсальной для всех людей.

С помощью новой технологии можно находить причину и проследить развитие гене-

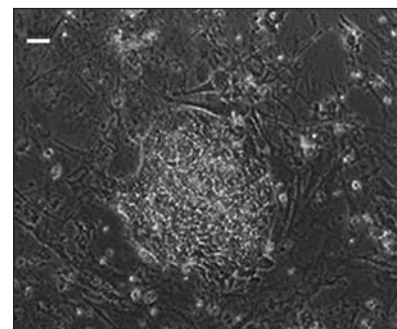
HUVES



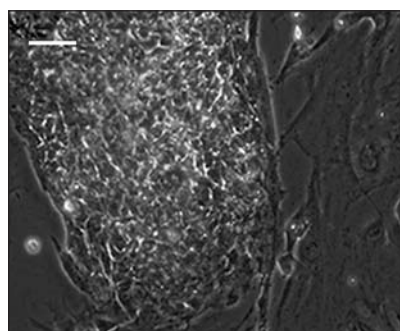
16 день



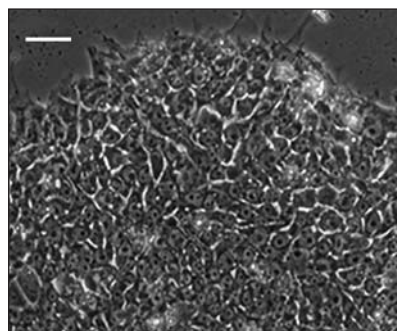
20 день



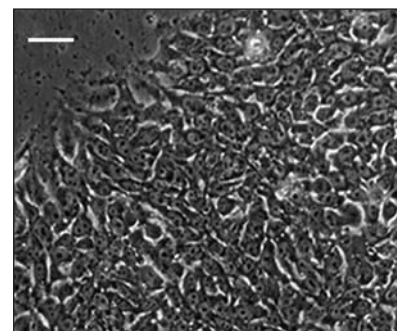
iPS 10



iPS 12

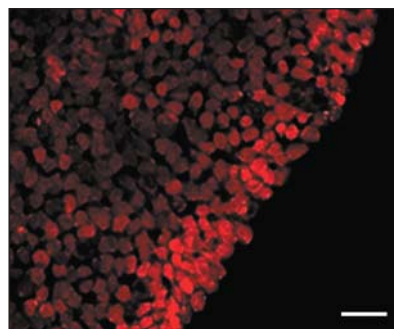
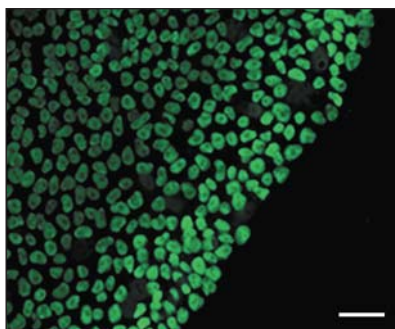
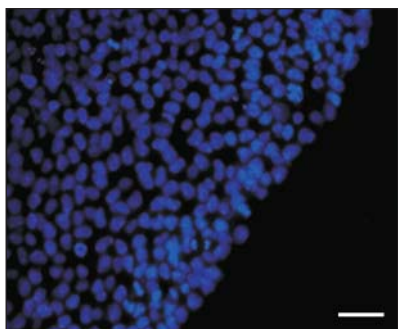


ЭСК

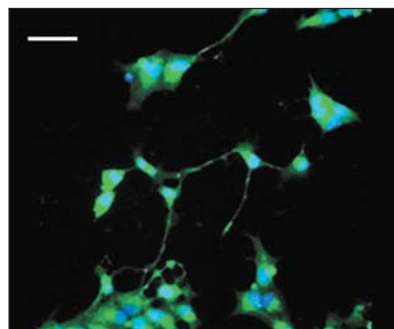
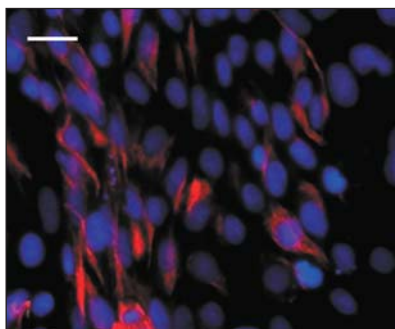
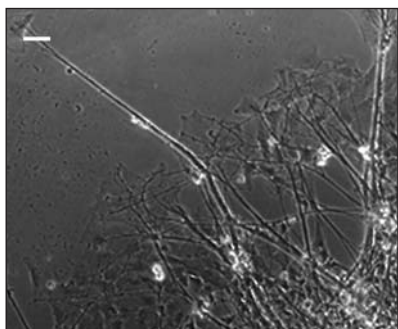


Изменение внешнего вида эндотелиальных клеток пупочной вены человека (HUVES) в процессе репрограммирования. Видно, как со временем клетки HUVEC изменяют морфологию, вырастают в колонии (на рисунке 16-й и 20-й дни культивирования) и дают начало клеткам с индуцированной плюрипотентностью (в данном случае — iPS 10, iPS 12). Морфологически они неотличимы от эмбриональных стволовых клеток (ЭСК) [8]. Размер масштабных линеек — 50 мкм.

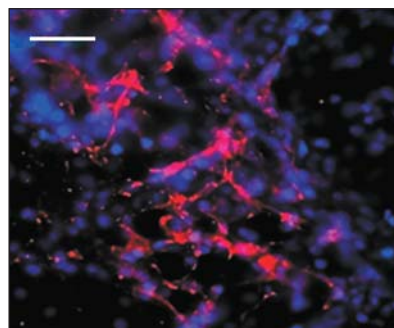
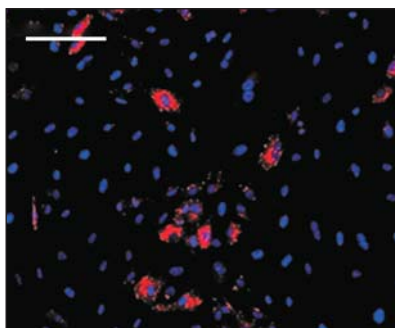
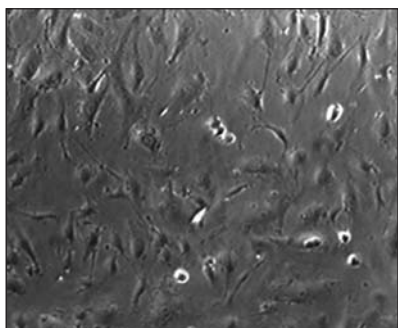
iPS 12



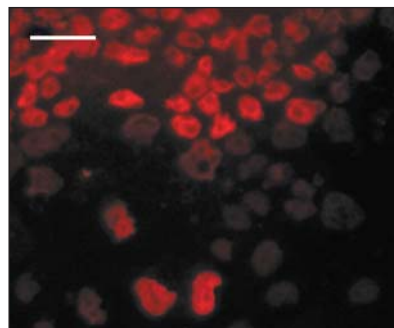
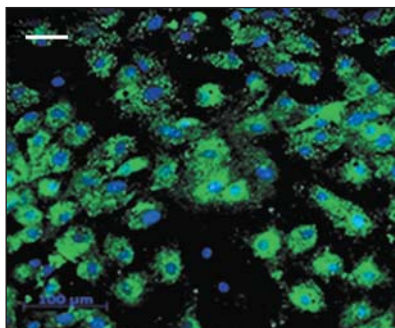
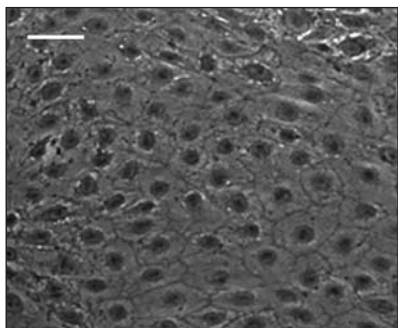
эктодерма



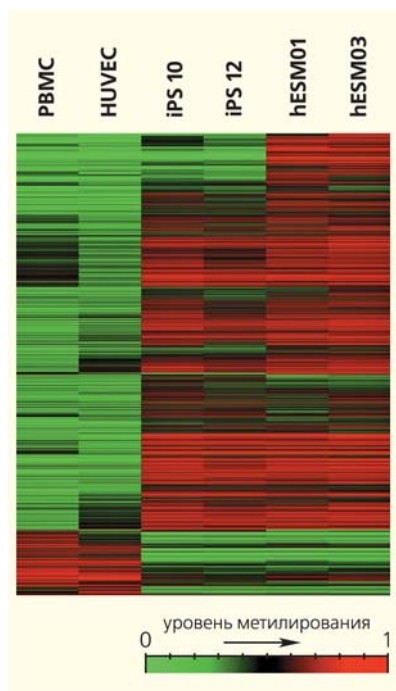
мезодерма



эндодерма



Микрофотографии iPS-клеток человека (верхний ряд) и их производных [8]. На трех фотографиях в верхнем ряду приведены данные иммуноцитохимического анализа: о плюрипотентном состоянии iPS-клеток и их сходстве с ЭСК свидетельствует присутствие в клеточных ядрах (светятся синим) молекулярных маркеров — белков OCT3/4 и NANOG (зеленое и красное свечение соответственно). iPS-клетки могут дифференцироваться в три типа клеток-предшественников всех тканей организма (эктодерму, мезодерму и эндодерму). Цветом обозначено присутствие белков-маркеров этих типов клеток. Размер масштабных линеек — 50 мкм.



Результаты анализа эпигенетического состояния (метиляции) более 14 тыс. генов. Оказалось, что более 2 тыс. генов плюрипотентных клеток (и ЭСК — hESM01, hESM03, и iPS — iPS 10, iPS 12) отличаются по уровню метилирования от дифференцированных клеток взрослого организма (PBMC, HUVEC). Разница между iPS-клетками и ЭСК незначительна.

тических болезней. Американские ученые получили плюрипотентные клетки из кожи пациента с синдромом Райли-Дея (семейной вегетативной дисфункцией). Это нейродегенеративное заболевание влияет на выживаемость и чувствительность нейронов. До сих пор не была выяснена причина этого тяжелого заболевания, встречающегося у каждого из 30 ашкенази Западной Европы. Получив из iPS-клеток больных разнообразные нейрональные клетки, ученые выяснили место мутации и смогли начать разработку компенсаторных лекарств [7].

В нашей лаборатории полгода назад впервые в России получены iPS-клетки, для которых в качестве источника мы выбрали эндотелиальные клетки пу-

почной вены человека [8]. Эти клетки легко выделять, они хорошо сохраняются, а самое главное — в отличие, например, от клеток кожи, не подвергались влиянию внешней среды, поэтому не несут мутаций ДНК. До этого времени опыты по получению плюрипотентных клеток из эндотелия не проводилось. С помощью «коктейля Яманаки» (так на научном жаргоне называются вирусы для репрограммирования) мы индуцировали плюрипотентность в клетках эндотелия. Через 16 дней появились первые группы клеток, напоминающие ЭСК, которые впоследствии дали начало iPS-клеткам. С недавнего времени в России появилась возможность проводить полногеномный анализ эпигенетического состояния (метиляции) генов, чем мы и воспользовались. Оказалось, что ЭСК и iPS-клетки отличаются по уровню метилирования (как правило, «молчащий» ген метилирован) только 46 генов, а различия между ЭСК и iPS-клетками не больше, чем различия между линиями ЭСК. Таким образом, мы не просто получили плюрипотентные клетки из эндотелиальных клеток человека, но и доказали их сходство с ЭСК на полногеномном уровне.

Трудно себе представить, но из одной единственной репрограммированной клетки кожи может развиваться целый организм. Пока эти эксперименты проведены только на мышах; возможно ли это для других видов, выяснится в ближайшем будущем.

Плюсы и минусы

Первые клетки с индуцированной плюрипотентностью были получены в конце 2006 г., а уже в середине 2009 г. удалось «исправить» в клетках крови генетические дефекты, которые вызывают анемию Фанкони. В стадии активной разработки находится методика коррекции диабета с помощью iPS-клеток.

Но это — лишь принципиальное доказательство возможностей технологии репрограммирования. Для использования таких «вылеченных» клеток в терапии необходимо получать их, не вмешиваясь в геном, т.е. не используя ретровирусы для доставки факторов плюрипотентности. Получены iPS-клетки больных диабетом, неврологическими заболеваниями. Эти модельные системы уже сегодня можно использовать для изучения развития заболеваний и подбора терапевтических средств их лечения.

Несомненно, появление такой технологии — колоссальный прорыв в цитогеномике. Однако механизмы генетического репрограммирования остаются неясными, да и у самой технологии пока немало недостатков. Если сравнить транскриптомы iPS-клеток и ЭСК, то окажется, что их генетические и эпигенетические портреты сходны лишь в общих чертах. Правда, зачастую их различия находятся в пределах различий и между линиями ЭСК. О чем это говорит? Во-первых, о том, что для создания программы развития, идентичной природной, недостаточно использования только цитоплазматических факторов (как в технологии переноса ядра) или только ядерных (как в генетическом репрограммировании). Во-вторых, никто пока не доказал, что реализация программы дифференцировки вдруг не пойдет иными, пока еще не известными путями. Иными словами, нет гарантий, что злокачественная трансформация в этих клетках невозможна, она ведь происходит даже в нормальных (развивающихся по природной программе) клетках организма. Последние эксперименты подтверждают, что такая трансформация возможна, а ее вероятность зависит от типа клеток, используемого для репрограммирования [9]. Таким образом, изучение свойств iPS-клеток требует не меньшего внимания,

чем их «родственников», естественных аналогов — ЭСК.

Отдельный вопрос, какой молекулярный механизм *in vitro* «заставляет» клетки взрослого организма возвращаться в плюрипотентное состояние. Когда мы рассуждаем, например, о фибробластах кожи, то мы говорим о миллионах клеток, выглядящих «как фибробласт». Но в каждом работает своя программа, и мы не имеем пока возможности охарактеризовать отдельно каждую клетку, входящую в этот миллион, и проследить за ее судьбой. В исходных работах эффективность образования iPS-клеток составляла сотые доли процента, сейчас она повысилась до десятых долей процента, но, как бы то ни было, не все клетки удается привести в плюрипотентное состояние. Правда, недавно доказано, что репрограммирование — стохастический процесс и, подбирая определенные факторы, можно пропорционально увеличивать количество iPS-клеток до нескольких процентов [10]. Тем не менее, если вспомним, что эффективность репрограммирования увеличивается, когда мы уменьшаем количество белка p53, подавляющего рост трансформированных клеток, станет ясно, что индукция плюрипотентности и опухолевая транс-

формация могут происходить в одних и тех же клетках. Пока мы не можем сказать определенно: случайное ли это событие, связанное с несовершенством работы генов, или «сознательно» сохраненное природой. В первом случае мы, вводя в клетку дополнительные факторы транскрипции плюрипотентного состояния, лишь немного ускорим естественные процессы, а во втором — заставим клетку изменить программу. От этого принципиальным образом зависит, насколько точно в дальнейшем будет воспроизводиться естественная программа развития клетки и насколько безопасна будет технология.

Еще совсем недавно была завершена работа над программой «Геном человека», уже полностью известны геномы некоторых других видов животных. Именно благодаря этим событиям удалось успешно создать технологию генетического «репрограммирования» клетки в плюрипотентное состояние. На самом деле первая успешная попытка генетического «репрограммирования» клетки была проведена сотрудниками Центра исследований рака им.Фреда Хатчинсона (Сиэтл): с помощью транскрипционного фактора MyoD, специфичного для мышц, они превратили фибробласты

кожи в мышечные клетки [11]. Через 19 лет после этого события Яманака повторил этот подход с четырьмя другими факторами и получил плюрипотентные клетки. Насколько они близки к практическому использованию? Чрезвычайно велики ожидания по терапевтическому применению этой технологии, но еще не ясно, насколько безопасны будут получаемые клетки, не приведут ли они к развитию опухолевого процесса. Намного более реальным выглядит применение этой технологии для создания моделей тех или иных заболеваний. Например, получены клетки с индуцированной плюрипотентностью от больных спинальной мышечной атрофией, из них, в свою очередь, получены нейроны, которые в лабораторных условиях ведут себя так же, как в организме больного. До появления индуцированных стволовых клеток такое исследование было бы невозможно. В прошлом году Яманака был выдвигнут на присуждение Нобелевской премии, что свидетельствует о значимости предложенной им технологии. Она еще далека до совершенства, и надо показать реальность ее практического использования, но уже сейчас сложно охватить все перспективы iPS-клеток. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 01-01-00227), Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Биологическое разнообразие» и ОАО Института стволовых клеток человека.

Литература

1. Takahashi K., Yamanaka S. // Cell. 2006. V.126. №4. P.663—676.
2. Okita K., Ichisaka T., Yamanaka S. // Nature. 2007. №448. P.313—317.
3. Yu J., Vodyanik M.A., Smuga-Otto J. et al. // Science. 2008. №318. P.1917—1920.
4. Wernig M., Lengner C.L., Hanna J. et al. // Nat. Biotech. 2008. №26. P.916—924.
5. Hanna J., Markoulaki S., Schorderet P. et al. // Cell. 2008. V.133. №2. P.250—257.
6. Seifinejad A., Taei A., Totonchi M. et al. // Biochem. Biophys. Res. Commun. 2010. V.391. №1. P.329—334.
7. Lee G., Papapetrou E.P., Kim H. et al. // Nature. 2009. V.461. № 7262. P.402—406.
8. Lagarkova M.A., Shutova M.V., Bogomazova A.N. et al. // Cell Cycle. 2010. V.9. №5. P. 937—946.
9. Miura K., Okada Y., Aoi T. et al. // S. Nat. Biotechnol. 2009. V.27. №8. P.743—745.
10. Hanna J., Saba K., Pando B. et al. // Nature. 2009. V.462. №7273. P.595—601.
11. Davis R.L., Weintraub H., Lassar A.B. // Cell. 1987. V.51. №6. P.987—1000.

Уран в нанотрубке



С.В.Кривовичев

Химический элемент, открытый в 1789 г. немецким химиком М.Г.Клаппротом (1743–1817) и названный в честь планеты Уран, радиоактивным был признан только в 1896 г., после открытия радиоактивности А.Беккерелем. В XX в. уран стал одним из главных элементов ядерной энергетики, чему во многом способствовали успехи радиохимии — химии урана и трансурановых элементов.

Последние 10–15 лет радиохимия переживает подлинный ренессанс. Это связано с появлением новых возможностей исследования вещества на микро- и наноуровне. Можно сказать, что нанотехнологический бум наконец-то достиг и этой довольно замкнутой и специфической науки. В открытой печати до недавнего времени практически отсутствовали сообщения о наноструктурах и наночастицах на основе урана и трансурановых элементов. В этой статье будет рассказано об успехах в этой области, в том числе и об успехах российских ученых, которые оказались готовы выдержать соперничество с лучшими мировыми научными коллективами.

Уран и уранил

Как элемент, металлический уран неустойчив в условиях земной поверхности и существует в составе минералов в виде катионов. Так, основная урановая руда, уранинит (UO_2), содержит че-



Сергей Владимирович Кривовичев, доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой кристаллографии геологического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, ведущий научный сотрудник Института химии силикатов им.И.В.Гребенщикова РАН. Лауреат премии Президента РФ в области науки и инноваций для молодых ученых (2008).

Научные интересы связаны с кристаллохимией и кристаллографией минералов, неорганической кристаллохимией и химией редких и радиоактивных элементов.

тырехвалентный уран (U^{4+}), связанный с атомами кислорода. Однако и катионы U^{4+} не полностью устойчивы в атмосфере и переходят в катионы U^{6+} . Это хорошо видно в зонах изменений урановых руд: на поверхности иссиня-черного уранинита растут пестро окрашенные минералы шестивалентного урана — ярко- и канареечно-желтые, оранжевые, красные, вишневые, зеленые. Эта красота опасна — все минералы сильно радиоактивны. Подобные процессы (переход U^{4+} в U^{6+}) происходят и в отработавшем ядерном топливе, в связи с чем на рубеже веков министерство энергетики США выделяло значительные средства на исследования.

Шестивалентный уран (как и другие высокозарядные катионы трансурановых элементов) уникален с точки зрения химии. Один катион U^{6+} , соединяясь с двумя атомами кислорода, образует комплексный катион (U^{6+}O_2)²⁺ линейной формы (рис.1). Этот катион, называемый уранил-катионом, иногда обозначают как $(\text{O}=\text{U}=\text{O})^{2+}$, подчеркивая тем самым высокую прочность связей $\text{U}=\text{O}$. Уранилион представляет собой основную форму существования урана в приповерхностных условиях, и именно ион переносится водными растворами и выпадает в виде высокорadioактивных осадков.

В экваториальной плоскости уранил-иона уран может образовывать дополнительные связи с кислородом, $\text{U}-\text{O}$, менее прочные, чем $\text{U}=\text{O}$. Таких атомов кислорода может быть четыре, пять или шесть (см. рис.1). Следовательно, полное число атомов этого элемента (т.е. координационное число) составит шесть, семь или восемь. Если на образовавшийся вокруг урана каркас из атомов кислорода «натянуть» оболочку, получится *координационный многогранник* в виде сплюснутых бипирамид — тетрагональной, пентагональной и гексагональной для четырех, пяти и шести экваториальных атомов соот-

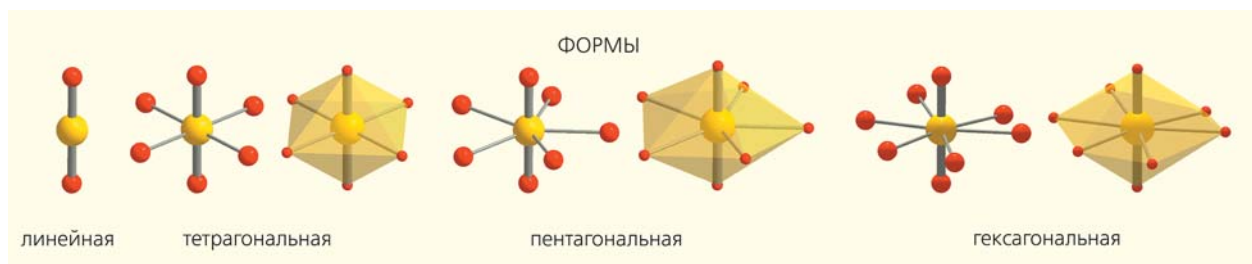


Рис.1. Схема строения линейного уранил-иона и бипирамид — основных структурных элементов урана в минералах и неорганических соединениях. Атомы урана показаны желтыми шариками, кислорода — красными; толстые стержни соответствуют связям $U=O$ в уранил-ионе, тонкие — связям $U-O$ в его экваториальной плоскости.

ответственно (см. рис.1). Эти многогранники и есть основные структурные элементы урана в минералах и неорганических веществах. Примерные длины связей в многограннике таковы: связь $U=O$ составляет около 0.18 нм, связь $U-O$ — около 0.22—0.24 нм, а линейный размер самого уранил-иона (с учетом радиуса атома кислорода в 0.13 нм) равен 0.62 нм ($0.18 \times 2 + 0.13 \times 2$).

Как может образоваться полная структура соединения, содержащего уранил? Если сложить две бипирамиды по граням, расстояние между центральными атомами урана (заряд катионов U^{6+} весьма высок!) будет слишком мало и они станут отталкиваться с такой силой, что существование структуры окажется энергетически невыгодным. Действительно, таких конфигураций в природе не бывает. Получится ли устойчивая структура, если сложить две бипирамиды по апикальному ребру? (У бипирамид два типа ребер — экваториальные, соединяющие экваториальные вершины, и апикальные, которые связывают экваториальную вершину с полюсом бипирамиды.) Увы! Бипирамиды, соединенные таким образом, тоже будут отталкиваться, и потому двойная конфигурация существовать не сможет. Остается сочленить многогранники по экваториальным ребрам и получить структуру из двух уранильных бипирамид. Именно такие структуры существуют примерно в половине природных и искусственных соединений урана. Подобное соединение, например, представляет собой минерал сприггит — уранил-оксид свинца, открытый в 2006 г. в Австралии (автор этих строк принимал непосредственное участие в исследовании атомной структуры минерала [1]). В сприггите тетрагональные и пентагональные бипирамиды, соединенные экваториальными ребрами, образуют плоские слои, между которыми располагаются атомы свинца и молекулы воды. Кстати, принцип объединения многогранников **всегда** в экваториальной плоскости (при связи по ребрам или по вершинам) задает *двумерность* полимеризации. Иными словами, уранильные бипирамиды, сложенные между собой по экваториальным ребрам, всегда образуют слой, причем слой довольно жесткий, негнущийся.

Уранильные слои свертываются в нанотрубки

Но можно ли сделать урановую структуру такой, чтобы слой сгибался, свертывался в трубку или свиток и даже обертывал сферу? Очевидно, для этого в структуре необходим элемент гибкости — гибкая связка между двумя соседними уранильными многогранниками. Такой связкой может служить дополнительный кислородный комплекс — координационный многогранник другого катиона, не накладывающий жестких ограничений на характер связи, например сульфат-ион. Группа $(SO_4)^{2-}$ представляет собой тетраэдр, в центре которого находится катион S^{6+} , а по вершинам — атомы кислорода. Этот комплекс существует, например, в структуре гипса $CaSO_4 \cdot 5H_2O$. Присоединение сульфатного тетраэдра к уранил-иону, действительно, приводит к образованию целого ряда замечательных структур с большим разнообразием структурных комплексов. Их в последние семь-восемь лет весьма активно изучала группа под руководством Д.О'Хара в Оксфордском университете [2]. Однако, за небольшими исключениями, слои «согнуть» так и не удалось. Надо было искать другой линкер (комплекс-связку). Этим мы и занялись и сочли наиболее подходящей геометрической формой все же тетраэдр. Методом проб и ошибок мы подобрали линкер. Им стал селенат-ион — аналог тетраэдрического сульфатного комплекса, но с катионом Se^{6+} в центре вместо S^{6+} . Ионный радиус Se^{6+} ненамного больше, чем радиус S^{6+} — всего на 0.016 нм, но, похоже, даже такая небольшая разница может сыграть значительную роль.

Эксперименты по получению новых селенатов уранила проводились совместно коллективами нашей кафедры и Института физической химии и электрохимии им.А.Н.Фrumкина РАН. Первоначально исследовались соединения с неорганическими катионами [3]. В полученных структурах пентагональные бипирамиды уранила соединяются через тетраэдры $(SeO_4)^{2-}$ в бесконечные слои, причем объединение идет через вершины координационных многогранников (рис.2). Соотношение уранил-ионов и селенат-ионов $(UO_2):(SeO_4)$ со-

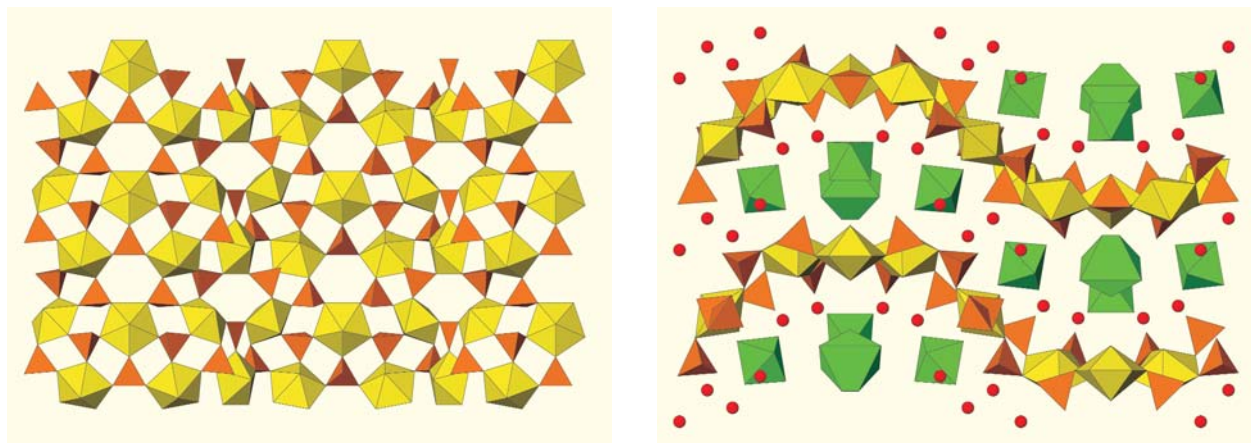
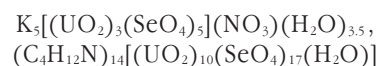


Рис.2. Слой из координационных многогранников урана (желтые) и тетраэдров селена (оранжевые) в структуре уранил-селената магния (слева). Справа приведена проекция этой же структуры вдоль направления простираения слоев. На проекции видно, что слои изгибаются, будто описывают синусоиду. Красными шариками обозначены атомы кислорода, серыми — атомы магния; зеленым цветом показаны координационные многогранники магния между уранил-селенатными слоями.

ставляет 3:5. Иными словами, химическая формула слоистого комплекса имеет вид $[(\text{UO}_2)_3(\text{SeO}_4)_5]$. Исходя из состава комплекса (U^{6+} , Se^{6+} и O^{2-}), нетрудно убедиться, что он заряжен отрицательно, а его формулу надо записать как $[(\text{UO}_2)_3(\text{SeO}_4)_5]^{4-}$. Для компенсации заряда в структуру соединения введены ионы Mg^{2+} , которые располагаются между слоями и окружены шестью молекулами воды каждый. Уранил-селенатные слои сильно изогнуты — они как будто описывают синусоиду с периодом 1.8 нм и амплитудой 1.2 нм (см. рис.2). Выходит, введение дополнительной связи между уранил-ионами позволяет слоям гнуться! Но как заставить их, скажем, свернуться в трубку? К сожалению, по-

ка окончательного ответа на этот вопрос у нас нет... Но сами трубки получены!

В двух наших структурах



уранил-селенатные комплексы представляют собой наноразмерные трубки (рис.3). Это совершенно уникальные образования. Для получения таких соединений чрезвычайно удачным оказался подбор условий синтеза. Как выяснилось, при определенных начальных концентрациях их кристаллы прекрасно растут из водных растворов при комнатной температуре. Достаточно растворить

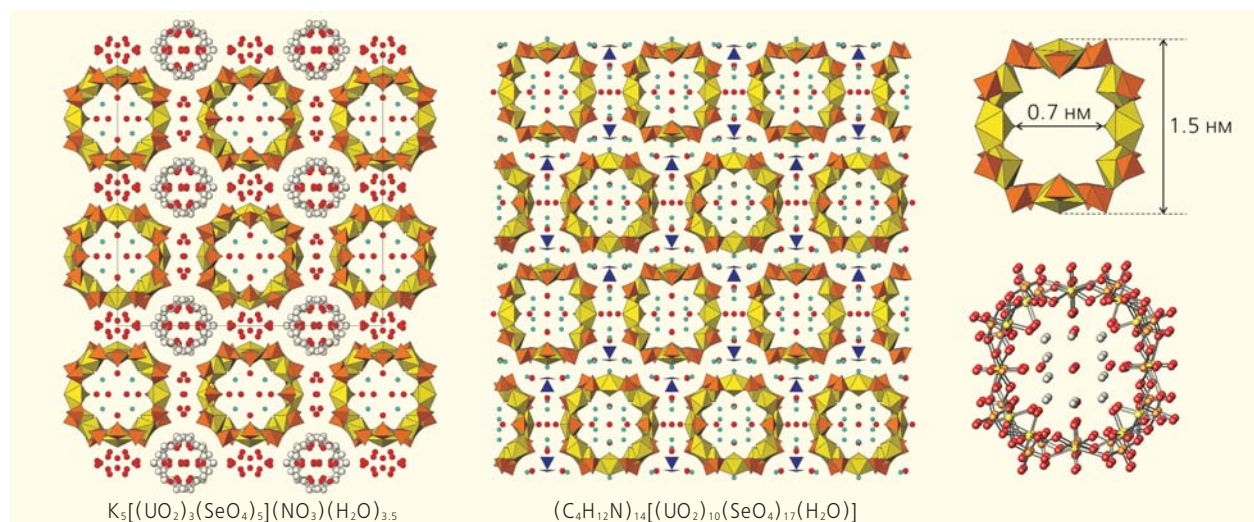


Рис.3. Проекция структур двух соединений, содержащих уранил-селенатные нанотрубки. Справа приведены изображения сечения отдельной нанотрубки в координационных многогранниках (вверху) и в шариковой модели. Условные обозначения — как на рис.1 и 2; серым цветом показаны атомы калия.

нитрат уранила и селеновую кислоту (H_2SeO_4) в воде, добавить неорганическую или органическую соль и, получив чистый раствор, вылить его на часовое стекло, чтобы испарить жидкость. Через несколько дней (а иногда часов!) на стекле начинают образовываться кристаллы хорошего качества. Они вполне подходят для исследования методом рентгеноструктурного анализа: кристалл играет роль дифракционной решетки для рентгеновских лучей. Направляя на кристалл рентгеновский пучок и регистрируя положение и интенсивность отраженных (дифрагированных) лучей, можно выяснить все детали внутренней структуры вещества (относительного расположения атомов) с точностью до 0.001 нм, а иногда и выше! В нашем распоряжении имелся как раз хороший современный дифрактометр.

Сначала «решалась» структура, т.е. определялись координаты всех атомов, затем наступил самый волнующий момент — ее визуализация (для этого разработаны специальные программы). Тогда-то и стало ясно, как атомы расположены в пространстве. Когда автор этих строк, «решив» структуру очередного уранил-селената, запустил программу визуализации, то на экране увидел невероятное: уранил-селенатный слой закручивался в трубку. Первоначально это показалось ошибкой, но проверка подтвердила, что все правильно. Изящно закручиваясь, уранил-селенатные комплексы формировали трубку диаметром примерно 1.6 нм. Мы назвали эти трубки нанотубуленами. В отличие от углеродных нанотрубок, они существуют в кристалле, хотя высока вероятность их обнаружения и в качестве отдельных объектов.

Вскоре успех повторился. На этот раз нанотубулены были крупнее — их диаметр составлял около 2.5 нм (рис.4). Сообщения о «малых»

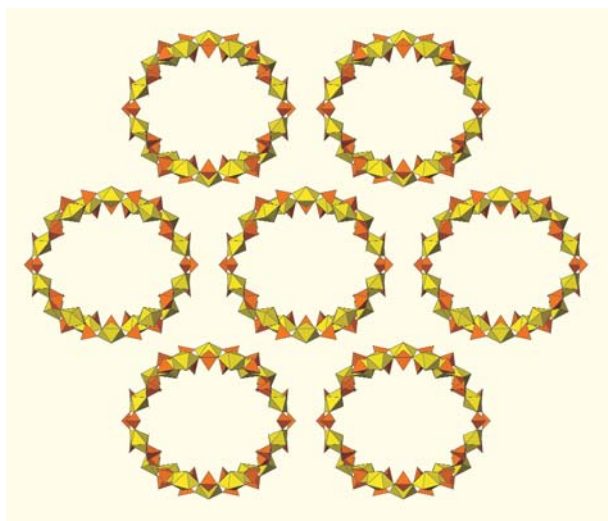


Рис.4. Схема кристаллической структуры уранил-селената с нанотубуленами диаметром 2.5 нм. Условные обозначения — как на рис.1 и 2.

и «больших» формах мы опубликовали в ведущих мировых химических журналах [4, 5], а развернутое изложение результатов — в отечественной «Радиохимии» [6]. Зарубежные коллеги отреагировали довольно быстро. Уже в 2005 г. ведущий американский специалист в области структурной химии урана и трансурановых элементов Т.Албрехт-Шмитт в обзоре последних исследований написал:

«What has been lacking from the literature regarding the actinides are examples of nanoscale features in well-defined compounds. This lacuna has now been partially filled with the recent discoveries of actinide-based nanotubules and nanospheres. The finding by Krivovichev et al. that the organically templated uranyl selenate $(\text{C}_4\text{H}_{12}\text{N})_{14}[(\text{UO}_2)_{10}(\text{SeO}_4)_{17}(\text{H}_2\text{O})]$ contains $[(\text{UO}_2)_{10}(\text{SeO}_4)_{17}(\text{H}_2\text{O})]^{14-}$ nanotubules is the first report of its kind in uranyl chemistry». («То, что отсутствовало в литературе касательно актинидов, — это примеры наноразмерной организации в отчетливо проявленных соединениях. Эта лакуна была частично заполнена недавними открытиями нанотубуленов и наносфер на основе оксидов актинидов. Открытие российскими учеными нанотубуленов состава $[(\text{UO}_2)_{10}(\text{SeO}_4)_{17}(\text{H}_2\text{O})]^{14-}$ в структуре темплатированного уранил-селената $(\text{C}_4\text{H}_{12}\text{N})_{14}[(\text{UO}_2)_{10}(\text{SeO}_4)_{17}(\text{H}_2\text{O})]$ представляет собой первое сообщение этого рода в химии уранила».) [7].

Характерно и само название его статьи — «Актинидные материалы обретают кривизну: нанотубулены и наносферы». Работа была также отмечена и другими крупными учеными в области химии урана и нанотехнологий [8, 9]. Таким образом, никто не сомневался в существовании и уникальности этих трубок.

Как устроены нанотубулены

Попробуем проанализировать структуру нанотубуленов, чтобы понять, как они образуются. «Малые» тубулены были обнаружены в двух соединениях — неорганическом и органическом. В обоих структурах это *анионные* комплексы одной и той же формулы: $[(\text{UO}_2)_3(\text{SeO}_4)_5]^{4-}$. Заряд компенсируется катионами калия (K^+), которые располагаются внутри тубуленов (подробнее об этом позже). В каждом из них атомы урана и селена химически связаны с атомами кислорода, причем одни принадлежат уранил-ионам, а другие — тетраэдрам (SeO_4). В свою очередь в тетраэдрах есть кислороды мостиковые, связывающие одновременно уран и селен, и концевые, которые соединены только с селеном.

Если удалить из тубулена все атомы кислорода (это нетрудно сделать в соответствующей компьютерной программе), а затем соединить отрезками атомы урана и селена, которые связаны мостиковыми кислородами, получится двухцветный

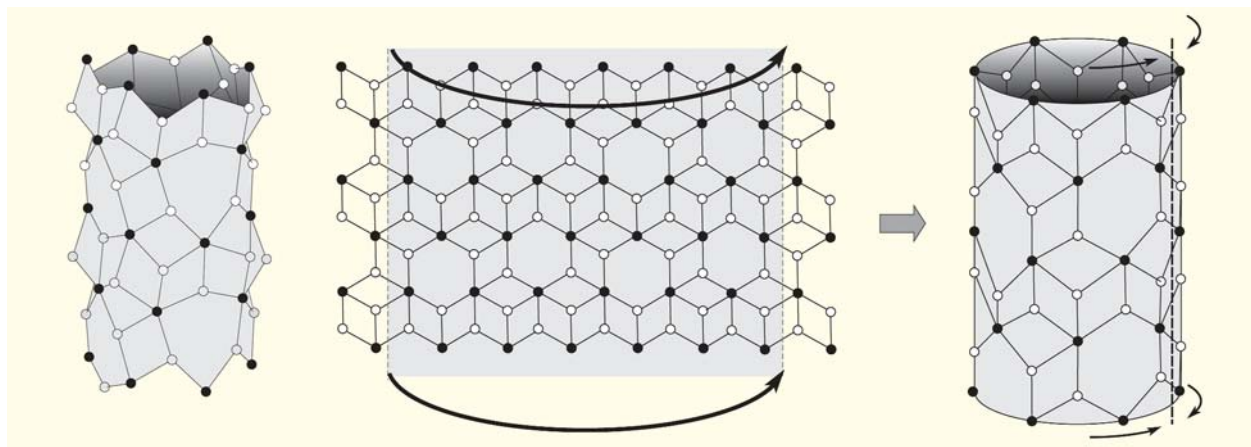


Рис.5. Двухцветный, черно-белый, одномерный граф нанотрубулена (слева), плоский граф (в середине) и снова граф нанотрубулена. Одномерный граф образован заменой атомов урана на черные, а атомов селена — на белые узлы, плоский граф получен разворотом предыдущего на плоскость. Чтобы перейти обратно к графу нанотрубулена от плоского графа, из него вырезана лента, а затем свернута противоположными сторонами (показано стрелками).

граф*-трубка (рис.5) — совокупность вершин (соответствующих атомам U и Se), связанных отрезками (или ребрами). Нетрудно заметить, что граф содержит элементарные кольца, или циклы, состоящие из четырех или из шести вершин. Из графа, разрезанного по прямой линии, параллельной оси трубки (см. рис.5), получается плоская лента. Ее можно «продлить» до плоского бесконечного графа, повторяя идентичные фрагменты с соответствующим периодом в направлении, перпендикулярном протяженности ленты. Полученный двумерный граф представляет собой прототип одномерного пористого графа-трубки. Для знакомых с углеродными нанотрубками такая операция хорошо известна. Теоретически углеродную нанотрубку можно получить из графитового слоя — графена, вырезав в нем ленту, а затем склеив ее противоположные края. Иными словами, графеновый слой — это предшественник углеродной нанотрубки. Если графеновые слои имеются в структуре графита, то, может быть, и для графа-трубки найдутся подобные слои в реальных структурах? Иначе говоря, есть ли для уранил-селенатного нанотрубулена предшествующая слоистая структура? Как оказалось, есть — ее удалось найти в целом ряде слоистых селенатов уранила [10].

Каким же образом, по каким принципам могут упаковываться нанотрубулены в разных структурах? Вообще говоря, о плотнейшей упаковке стержней

одинакового диаметра неоднократно говорилось в научной литературе — главным образом в связи с ориентацией каналов в пористых структурах. Но об упаковке наноразмерных трубок речь никогда не шла. Попробуем восполнить этот пробел.

Уранил-селенатные нанотрубулены имеют примерно круглые сечения, которые в проекции образуют гексагональную упаковку (см. рис.5). Рядом с каждым нанотрубуленом на одном и том же расстоянии располагаются по шесть таких же структур. Но если нанотрубулены разделены колонками из органических молекул, образуется тетрагональная упаковка. Она не самая плотная, так как в структуре присутствуют объемные органические молекулы, например кольцевые краун-эфиры.

Упаковка и образование нанотрубуленов

От чего зависит взаимное расположение соседних нанотрубуленов? Какие движения может совершать бесконечная трубка, не перемещаясь в направлении, перпендикулярном своей оси? Ответ очевиден — она может вращаться вокруг оси и двигаться вверх-вниз параллельно самой себе. Именно эти два типа движений и определяют положение нанотрубуленов друг относительно друга. При вращении возможны только две ориентации, отличающиеся поворотом на прямой угол 90° (рис.6). При вертикальных смещениях тоже существуют только два положения нанотрубуленов вдоль вертикальной оси, и они отличаются на половину трансляции*.

* Для описания структур, путей сложных реакций сейчас часто используется компьютерная химия — сравнительно молодая область, основанная на применении теории графов. В общем смысле граф представляется как множество вершин (узлов), соединенных ребрами, это наиболее общий метод изображения химических структур. Граф обладает замечательным свойством — он остается неизменным при любых деформациях структуры, не сопровождающихся разрывом связей между ее элементами.

* Структура нанотрубуленов (как, впрочем, и углеродных нанотрубок) периодична, т.е. повторяется вдоль оси через одинаковые промежутки. Минимальное расстояние между такими повторами называется периодом трубки, или трансляцией (структура трубки транслируется вдоль ее оси).

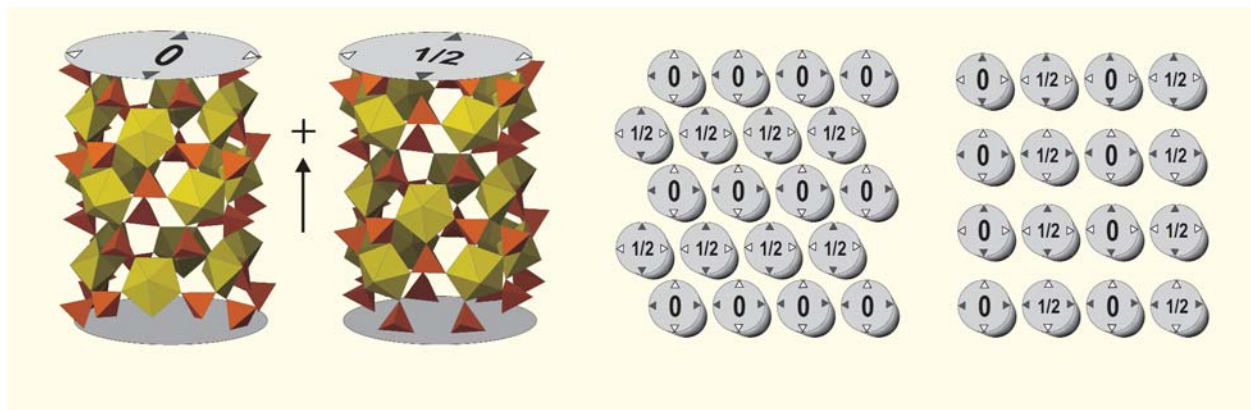


Рис.6. Принципы взаимной ориентации уранил-селенатных нанотрубуленов. Они могут поворачиваться вокруг вертикальной оси (помечено черными и белыми треугольниками-засечками над трубуленами) на один и тот же угол (90°), но смещены вдоль нее на $1/2$ трансляции. Справа приведены схемы относительного расположения нанотрубуленов в структурах, проекции которых показаны на рис.3.

Так вот, соседние уранил-селенатные нанотрубулены находятся либо на нулевом уровне, либо на уровне половины трансляции (см. рис.6). Таким образом, все разнообразие отношений между соседними нанотрубуленами может быть описано как «поворот на прямой угол + вертикальное смещение на полтрансляции». По всей видимости, такой дискретный набор «операций» соответствует требованиям наилучшей пространственной упаковки.

Что касается «больших» нанотрубуленов, то их сечение представляет собой скорее эллипс, чем окружность (см. рис.6). Но упаковка все равно подчиняется гексагональному закону — рядом с каждым нанотрубуленом расположено шесть ближайших. Так же как и для «малых» нанотрубуленов, для «больших» можно сконструировать двухцветный граф и построить двумерный предшественник. Отметим, что для «больших» нанотрубуленов слоистая структура-предшественница пока еще не обнаружена.

Остается понять, как происходит искривление уранил-селенатных слоев. Чтобы разобраться в этом, заметим, что обе наши структуры с «малыми» нанотрубуленами содержат внутри катионы K^+ . Может быть, они как-то ответственны за образование изогнутых структур? Катион K^+ при взаимодействии с внутренней стенкой нанотрубулена образует шесть химических связей (рис.7): две с атомами кислорода уранил-ионов, две — с мостиковыми кислородами и две — с концевыми атомами кислорода селенатных тетраэдров. Поразительно, но такое взаимодействие характерно для обеих структур и даже длины связей повторяются с удивительной точностью. По всей видимости, катион K^+ «наклоняет» соседние уранил-катионы друг к другу, в результате чего их экваториальные плоскости образуют вогнутую лунку — появляется кривизна!

Если обратить внимание на строение уранил-селенатного комплекса (см. рис.7), станет ясно,

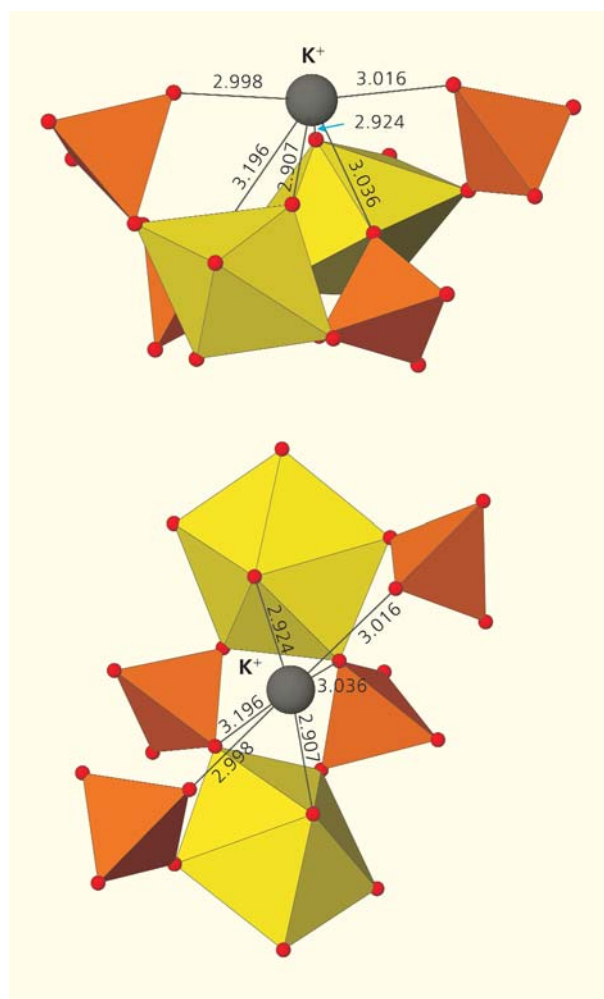


Рис.7. Катион калия, «привязанный» к стенкам нанотрубуленов шестью связями; вид сбоку (вверху) и сверху. K^+ — серый шарик, связи калий-кислород показаны серыми стержнями; числами даны длины связей.

что он представляет собой кольца из двух пентагональных бипирамид уранила, связанных тетраэдрами, причем к этому кольцу с двух сторон «привешено» еще по одному тетраэдру. Такая конфигурация называется «разветвленным четверным кольцом» (Branched 4-Membered Ring, B4MR). Мы предполагаем, что этот комплекс играет ведущую роль при росте подавляющего большинства уранил-селенатных структур [11]. Иными словами, из таких деталей строится структура путем их последовательного присоединения. Когда четверное кольцо соединяется с катионом K^+ , тот его деформирует, искривляет, и при удачном сшивании соседних колец образуется трубчатая структура (рис.8). Механизм этого процесса «самосборки» может быть описан исходя из теории конечных автоматов [12], но это уже тема для отдельной статьи. Кстати, существование «разветвленного четверного кольца» косвенно подтверждено нами: в среде кристаллизации оно обнаружено в структуре одного из селенатов уранила в качестве изолированного комплекса. Есть еще одно, тоже не прямое подтверждение — четверные кольца играют решающую роль в процессах самоорганизации в разнообразных химических системах с тетраэдрическими комплексами [13, 14].

Что дальше?

Итак, уранил-селенатные нанотрубулены стали одним из первых примеров наноструктур, содержащих уран. Существует ли, помимо фундаментальной важности их открытия, некая практическая значимость? Хотя говорить о прямой реализации пока рано, позволительно наметить некие возможности. Во-первых, аналогичные пористые нанотрубулены, построенные из молибдатов или си-

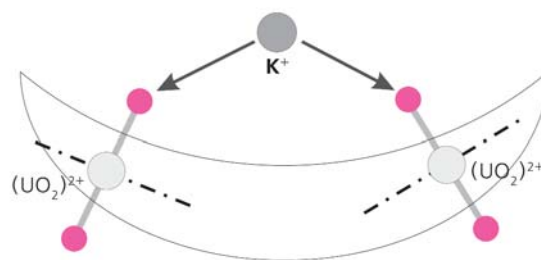


Рис.8. Схема, показывающая влияние катионов калия на кривизну слоев уранил-ионов. K^+ , образуя связи с атомами кислорода этих ионов, заставляет их «кланяться» друг другу, индуцируя кривизну слоев. Штрих-пунктирной линией намечены экваториальные плоскости уранил-ионов.

ликатов уранила, могут быть использованы в качестве новых форм концентрации радионуклидов в радиоактивных отходах. Во-вторых, интересную идею подал недавний лауреат Ломоносовской медали Российской академии наук американский ученый Р.Юинг. В США для «адресного» воздействия на раковые клетки ведутся активные разработки по доставке радиоактивных изотопов внутри углеродных нанотрубок. Что если использовать нанотрубки, непосредственно состоящие из радиоактивных элементов (предположим, из высокорadioактивного изотопа U-235)? «Обернув» их молекулярной биологической оболочкой, можно попытаться организовать целенаправленную доставку к пораженному органу, отслеживая их перемещение по организму с помощью детекторов радиации.

Работа наша продолжается. Экзотический наномир урана и трансурановых элементов еще только приоткрывает свои тайны. Кто знает, какие удивительные структуры нам еще предстоит увидеть? ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 06-03-32096.

Литература

1. Brugger J., Krivovichev S.V., Berlepsch P. et al. // *Amer. Mineral.* 2004. V.89. P.339–347.
2. Norquist A.J., Doran M.B., Thomas P.M., O'Hare D. // *Dalton Trans.* 2003. V.2003. P.1168–1175.
3. Krivovichev S.V., Kahlenberg V. // *Z. Anorg. Allg. Chem.* 2004. V.630. P.2736–2742.
4. Krivovichev S.V., Kahlenberg V., Kaindl R. et al. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2005. V.44. P.1134–1136.
5. Krivovichev S.V., Kahlenberg V., Tananaev I.G. et al. // *J. Amer. Chem. Soc.* 2005. V.127. P.1072–1073.
6. Кривовичев С.В., Тананаев И.Г., Каленберг В. и др. // *Радиохимия.* 2005. Т.47. С.481–491.
7. Albrecht-Schmitt T.E. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2005. V.44. P.4836–4838.
8. Epbritikbine M. // *Dalton Trans.* 2006. V.2006. P.2501–2516.
9. Tenne R. // *Nature Nanotechnol.* 2006. V.1. P.103–111.
10. Krivovichev S.V., Kahlenberg V. // *J. Alloys Compds.* 2005. V.389. P.55–60.
11. Тананаев И.Г., Кривовичев С.В., Гуржий В.В., Мясоедов Б.Ф. Микроскопическая модель кристаллогенезиса из водных растворов селената уранила // *Современные проблемы физической химии наноматериалов / Под ред. А.Ю.Цивадзе. М., 2008. С.106–116.*
12. Krivovichev S.V. // *Acta Crystallogr.* 2004. V.A60. P.257–262.
13. Krivovichev S.V., Kahlenberg V. // *Z. Anorg. Allg. Chem.* 2005. V.631. P.2352–2357.
14. Rao C.N.R., Natarajan S., Choudhury A. et al. // *Acc. Chem. Res.* 2001. V.34. P.80–87.

Квантовые состояния как посредники в магнитном взаимодействии

А.М.Шикин, О.Радер

Изучение спиновой электронной структуры различных систем и определяемых ею физико-химических свойств привлекает в последнее время все большее внимание ученых во всем мире. В современной науке и технике появилось целое направление, использующее возможность управлять этой структурой, — спинтроника [1–3]. Толчком для развития подобных работ послужило открытие эффектов осциллирующего обменного магнитного взаимодействия и гигантского магнитного резонанса сопротивления в многослойных магнитных системах. Само открытие и исследования в данной области были отмечены в 2007 г. Нобелевской премией по физике [1–4]. Они привели к резкому увеличению возможной плотности записи информации, что уже сегодня широко используется в устройствах записи и считывания в компьютерах нового поколения и ряде других электронных устройств. В основе упомянутых эффектов лежит возможность модуляции магнитных характеристик систем, которые состоят из чередующихся слоев ферромагнитных и немагнитных металлов, в зависимости от



Александр Михайлович Шикин, доктор физико-математических наук, профессор физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, член Управляющего комитета Российско-Германской лаборатории в Центре синхротронного излучения BESSY при Гельмгольц-центре (Берлин). Область научных интересов — спиновая и электронная структура низкоразмерных систем и наноструктурированных материалов.



Оливер Радер, доктор естественных наук, доцент, руководитель группы в Институте комплексных магнитных материалов Гельмгольц-центра. Научные интересы связаны с исследованиями в области спин-зависимой электронной структуры низкоразмерных систем различного типа, поверхностного магнетизма и синхротронного излучения.

толщины немагнитного металла. Пример слоистой системы такого рода с ферромагнитным и антиферромагнитным типом взаимодействия между слоями схематически представлен на рис.1,а. В качестве немагнитных металлов здесь часто используют благородные (Au, Ag) и близкие к благородным (Cu) металлы. Проанализируем, как модулируются магнитные свойства подобных систем на детальном уровне формирования их спиновой электронной структуры, и постараемся понять причины, порождающие эти эффекты.

© Шикин А.М., Радер О., 2010

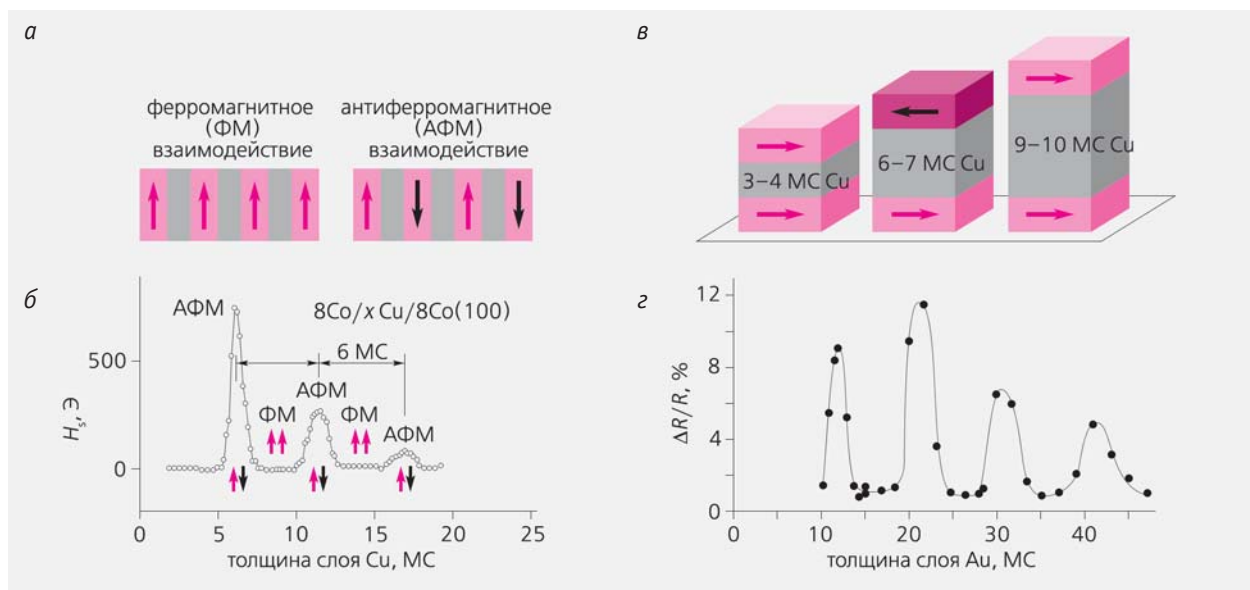


Рис.1. Модуляция магнитных характеристик слоистых металлических систем. Схематическое представление структуры слоистых металлических систем на основе чередующихся слоев магнитных и немагнитных металлов с ферромагнитным и антиферромагнитным типом взаимодействия между магнитными слоями (а). Стрелки показывают направление магнитного момента. Периодическая модуляция степени магнитного взаимодействия антиферромагнитного типа в слоистых металлических системах $\text{Co}(100)/\text{Cu}(100)/\text{Co}(100)$ в зависимости от толщины промежуточного слоя немагнитного металла (б). Характеристикой взаимодействия служит величина магнитного поля H_s , которое нужно приложить, чтобы обеспечить переход между антиферромагнитным и ферромагнитным упорядочением системы. Максимумы соответствуют антиферромагнитному взаимодействию, а минимумы — ферромагнитному (поле нулевое) [5, 6, 8]. Толщина слоя измеряется числом монослоев (МС). Периодическое изменение типа магнитного взаимодействия с ферромагнитного на антиферромагнитное и наоборот по мере роста толщины слоя немагнитного металла (в). Модуляция величины магнитосопротивления для многослойных систем типа $\text{Au}/\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}$ в зависимости от толщины слоя немагнитного металла, Au (з) [5, 8].

На «качелях» магнитного взаимодействия

В результате многочисленных исследований был обнаружен ряд весьма необычных и интригующих свойств слоистых металлических систем. Среди них как наиболее важные выделим следующие.

Было показано, что магнитные свойства слоистых систем на основе чередующихся слоев ферромагнитных и благородных (или близких к ним) металлов зависят осциллирующим образом от толщины слоев немагнитного компонента (см., например, работы [5–8]). В качестве иллюстрации на рис.1,б представлена зависимость степени магнитного взаимодействия антиферромагнитного типа между магнитными слоями в системе $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Co}(100)$ от толщины слоя немагнитного металла (в данном случае $\text{Cu}(100)$), полученная с использованием магнитооптического эффекта Керра. Явным образом видна регулярная модуляция магнитного момента системы с периодом повторения максимумов, соответствующим добавлению 5–6 монослоев Cu (число монослоев Co в каждом слое магнитного металла для данной системы — восемь). Аналогичное периодическое

поведение магнитных свойств наблюдается и для других слоистых металлических систем — $\text{Fe}/\text{Ag}/\text{Fe}(100)$, $\text{Ni}/\text{Cu}/\text{Ni}$, $\text{Fe}/\text{Au}/\text{Fe}$ и т.п.

Подчеркнем, что при вариации толщины немагнитной прослойки меняется сам тип магнитного взаимодействия между слоями магнитных металлов — с ферромагнитного на антиферромагнитный и наоборот. Рис.1,в демонстрирует, как ведет себя взаимная ориентация магнитных моментов в соседних магнитных слоях при увеличении толщины промежуточного слоя немагнитного металла от 3–4 до 9–10 монослоев. Ферромагнитный тип взаимодействия (ориентация магнитных моментов в соседних слоях магнитных металлов параллельна) при толщине слоя меди 3–4 монослоя, естественно присущий ферромагнетикам (Fe, Co, Ni и др.), уступает место антиферромагнитному (с противоположно направленными магнитными моментами в соседних слоях), когда толщина слоя меди достигает 6–7 монослоев. Затем, при толщине слоя меди 9–10 монослоев, взаимодействие снова становится ферромагнитным. Период изменения типа магнитного взаимодействия отвечает 5–6 монослоям по толщине немагнитного компонента.

Величина магнитосопротивления слоистых металлических систем (т.е. изменение сопротивления системы при приложении внешнего магнитного поля определенной напряженности) также меняется осциллирующим образом с толщиной слоя немагнитного металла, рис.1,з (см., например, [5, 6, 8]).

Возникает естественный вопрос — что обуславливает такое изменение магнитных характеристик наших объектов и почему свойства систем, связанные с ферромагнетиками, зависят от толщины слоя немагнитного металла? В процессе исследований [5—12] было установлено, что отмеченные выше физические явления коррелируют с эффектами квантования электронной структуры в тонких слоях немагнитных металлов и их зависимостью от толщины этих слоев. Напомним, как возникают эти эффекты.

От непрерывного электронного спектра к дискретному

В массивных металлах можно считать, что энергетические уровни заполняют зону валентных состояний непрерывным образом; от дна валентной зоны до уровня Ферми все состояния заполнены электронами, а выше — пусты. Однако в случае, когда размеры тела хотя бы в одном направлении становятся малыми, порядка нескольких нанометров или менее (для сравнения: диаметр атома составляет ~0.2—0.3 нм), электронная структура систем существенно изменяется (подобные системы называются низкоразмерными). Именно такая ситуация имеет место для ультратонких пленок толщиной от нескольких атомных монослоев до нескольких десятков: происходит переход от непрерывного спектра электронных состояний к дискретному. Для низкоразмерных систем в области валентной зоны формируется конечное число дискретных энергетических уровней, энергия которых определяется размерными ограничениями системы, т.е. в случае тонких пленок — толщиной.

Простейшая модель, приводящая к размерному квантованию электронной структуры, — модель потенциального ящика, рис.2; его ширина совпадает с толщиной пленки. Так как электроны описываются волновыми функциями с длиной волны, обратно пропорциональной их энергии, внутри данного потенциального ящика могут существовать только те электронные волны, длина волны которых коррелирует с шириной потенциального ящика L (см. рис.2,а). При изменении этой ширины трансформируются и возможные для данной системы уровни энергетического спектра электронов — в соответствии с выражением

$$E_n = \hbar^2 \pi^2 n^2 / 2mL^2$$

(ср. рис.2,а и рис.2,б). Данные дискретные электронные состояния называются квантовыми, а их

энергетический спектр — спектром квантовых состояний.

У металлов, в отличие от полупроводников, в электронной структуре нет абсолютной запрещенной зоны, которая лишена разрешенных электронных состояний и могла бы играть роль стенок потенциального ящика, т.е. создавать условия для размерного ограничения волновых функций в пределах напыляемых слоев других металлов. Однако для определенных кристаллографических направлений и в металлах имеются энергетические интервалы, где разрешенные электронные состояния отсутствуют; их можно рассматривать как «относительные» запрещенные зоны. Если взять такой металл в качестве подложки для роста пленки, «относительная» запрещенная зона в электронной структуре подложки станет тем препятствием, которое ограничивает волновые функции формируемой сверху металлической пленки с одной стороны (см. рис.3, слева). Роль другой стенки потенциального ящика, через которую волновые функции электронов пленки не проникают в противоположную сторону, играет поверхностный потенциальный барьер (см. рис.3, справа). Ограничение волновых функций электронов в формируемой металлической пленке за счет потенциальных барьеров с обеих сторон приводит к дискретизации электронной структуры и формированию спектров квантовых состояний, зависящих от толщины пленки.

Для регистрации спектров квантовых состояний может быть использован метод фотоэлектронной спектроскопии, в основе которого лежит возбуждение электронов из валентной зоны под воздействием электромагнитного излучения (на-

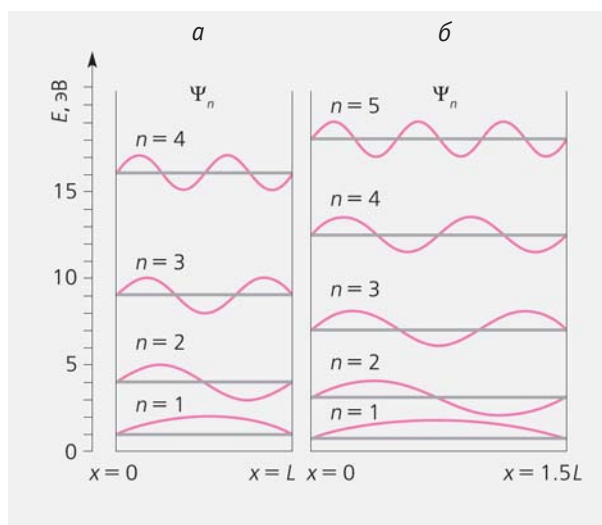


Рис.2. Схематическое изображение энергетического расположения разрешенных состояний и соответствующих им волновых функций в потенциальной яме, ограниченной бесконечными стенками. Ширина потенциальной ямы: а — L , б — $1.5L$.

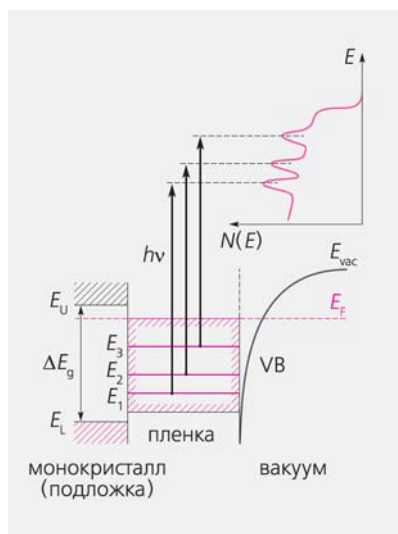


Рис.3. Ограничение волновых функций в тонких металлических слоях за счет потенциального барьера на границе с вакуумом (VB) с одной стороны слоя и за счет локальной запрещенной зоны ΔE_g в электронной структуре подложки с другой стороны, приводит к квантованию электронной структуры пленки (энергии E_1, E_2, E_3). Соответствующую дискретизацию электронного спектра можно зарегистрировать с помощью измерения распределения фотоэлектронов по энергиям $N(E)$. E_f — уровень Ферми, E_U и E_L — верхний и нижний края локальной запрещенной зоны соответственно [16].

пример, с энергией $h\nu$, как показано на рис.3). Поскольку кванты излучения поглощаются электронами валентной зоны целиком, спектр вышедших в вакуум фотоэлектронов практически соответствует энергетическому распределению электронов в валентной зоне пленки. Результирующий спектр квантовых состояний, зарегистрированный энергоанализатором, представляет собой периодические осцилляции электронной плотности (пики квантовых состояний). Согласно изложенным выше соображениям, эти пики должны смещаться по энергии с изменением толщины металлической пленки (см. рис.3, справа вверху).

И действительно, этот эффект обнаруживается — на рис.4,а представлены реальные экспериментальные спектры квантовых состояний, формируемые в пленке Ag (111) на поверхности Mo(110) по мере увеличения толщины пленки, на-

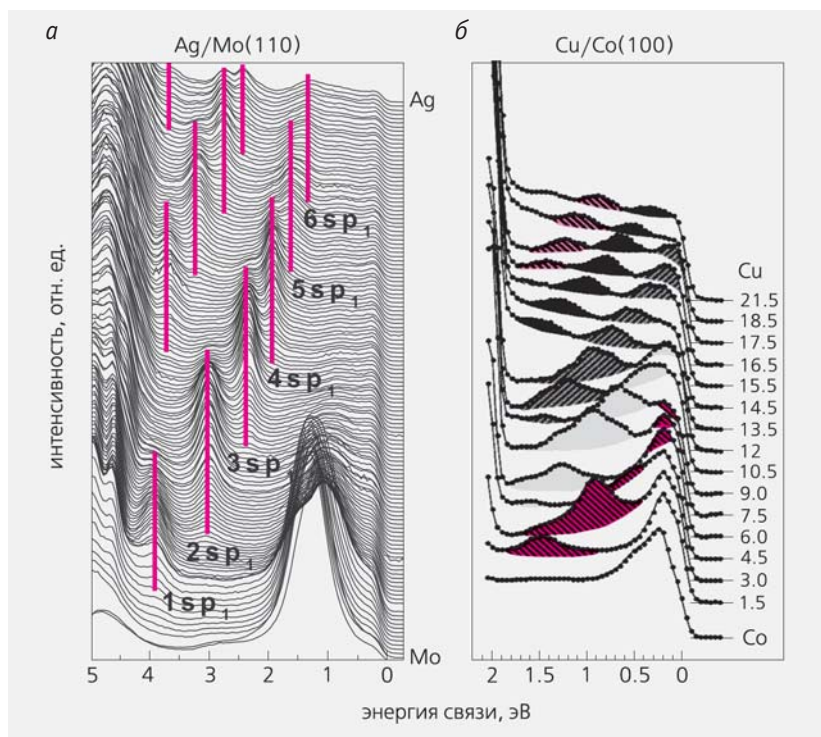


Рис.4. Экспериментальные спектры квантовых состояний в слое Ag(111) на поверхности Mo(110), измеренные по мере роста толщины слоя методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (а). Спектры последовательно смещены вверх по мере роста толщины слоя Ag(111) начиная от субмонослойных покрытий и до толщины 6 монослоев [16]. Вертикальные черточки указывают положение квантовых состояний при различных толщинах пленки Ag(111). Энергия возбуждающего излучения равна 60 эВ. Экспериментальные спектры квантовых состояний в слое Cu(100) на поверхности Co(100) для различных толщин (МС) слоя Cu (б). Значения толщин измеряемых слоев показаны справа от спектров [10, 11]. Энергия возбуждающего излучения равна 8 эВ. По мере роста толщины уровень Ферми пересекается различными ветвями квантовых состояний (заштрихованы по-разному).

чиная от субмонослойных покрытий и до толщины пленки ~6 монослоев [15, 16]. Каждой толщине пленки (с шагом ~0.05 монослоя) соответствует свой спектр квантовых состояний. По мере увеличения толщины слоя Ag(111) пики квантовых состояний сдвигаются в сторону меньших энергий связи. На рис.4,б приведены аналогичные изменения спектров квантовых состояний, формирующихся в пленках Cu(100) на поверхности Co(100) [9—11], т.е. в пленках с другой кристаллической ориентацией (напомним, грань (100) — это боковая грань куба, а (111) — диагональная). Здесь также спектры сдвигаются в сторону уменьшения энергий связи с ростом толщины пленки Cu(100). Однако обращает на себя внимание тот факт, что для пленок Ag со структурой (111) формируемые квантовые состояния по мере роста толщины пленки не пересекают уровень Ферми, тогда как

для пленок Cu со структурой (100) квантовые состояния при определенных толщинах пленок доходят до уровня Ферми ($E = 0$) и пересекают его, переходя в область незаполненных состояний. Эта разница в поведении квантовых состояний может быть объяснена различием в энергетическом расположении валентной зоны для разных кристаллографических направлений. Если для направления $\langle 111 \rangle$ край sp -валентных состояний серебра расположен при энергиях связи на 0,3 эВ ниже уровня Ферми, то для направления $\langle 100 \rangle$ край sp -состояний меди расположен при энергиях на ~ 2 эВ выше уровня Ферми. Именно это и определяет различие в энергетических зонах существования соответствующих квантовых состояний. По мере роста толщины пленки квантовые состояния сдвигаются к верху валентной зоны, энергетическое положение которой меняется в зависимости от кристаллической структуры формируемых пленок. Аналогичные спектры квантовых состояний, энергетическая локализация которых обусловлена особенностями электронной структуры как самой пленки, так и подложки, на которой она вырастает, наблюдаются и для других систем и комбинаций металлов [12–18].

Интересно проследить, как изменения энергетических положений квантовых состояний в тонких слоях Cu(100) зависят от толщины последних, рис.5,а [12]. Тонкие слои Cu(100) на поверхности слоев Co(100), напомним, служат составной частью слоистой магнитной системы, для которой характерны эффекты модуляции магнитных свойств в зависимости от толщины слоя Cu (см. рис.1). Из рис.5,а видно, что по мере роста толщины слоя Cu различные ветви квантовых состояний при определенных толщинах пересекают уровень Ферми,

а сами квантовые состояния переходят из области заполненных состояний в область незаполненных. Причем период пересечения квантовыми состояниями уровня Ферми как раз соответствует 5–6 монослоям по толщине слоя Cu! Итак, имеет место явная корреляция между пересечением уровня Ферми квантовыми состояниями, формирующимися в слое немагнитного металла (Cu), и периодической модуляцией магнитных свойств слоистых магнитных систем, представленной на рис.1.

Возникает следующий вопрос — каким образом квантовые состояния на уровне Ферми в немагнитном металле могут воздействовать на магнитные свойства системы?

Индукцированный спин немагнитных слоев

Эксперименты показали, что контакт ферромагнитного металла с благородным (или близким к благородному) может вызывать соответствующую спиновую поляризацию квантовых состояний в тонких слоях немагнитного металла [5, 9–11]. (Следует отметить, что в обычном состоянии благородные металлы характеризуются электронной структурой, вырожденной по спину, т.е. не зависящей от его направления, иначе говоря — отсутствием энергетического расщепления для состояний с различным направлением спина). На рис.6 показаны изменения спектров квантовых состояний вблизи уровня Ферми для системы Cu(100)/Co(100), зарегистрированные методом фотоэлектронной спектроскопии со спиновым разрешением [9–11]. Видно, что квантовые состояния, формирующиеся в слое Cu на поверхности ферромагнитного металла, действительно рас-

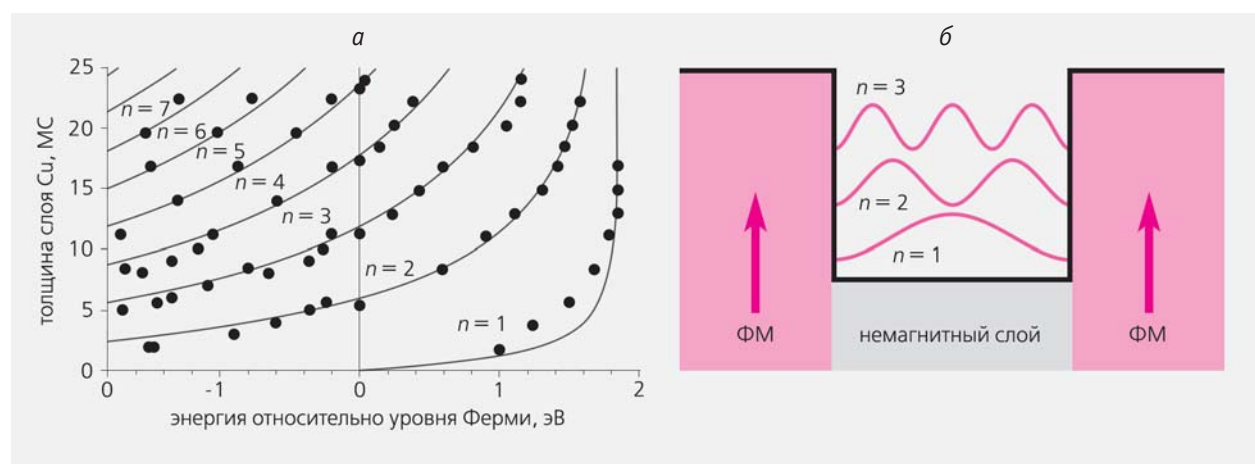


Рис.5. Зависимости энергетического положения квантовых состояний от толщины пленки Cu(100) для системы Cu/Co(100) в энергетической области, включающей как зону заполненных состояний ниже уровня Ферми, так и свободные состояния выше уровня Ферми (а). Видно, что пересечение уровня Ферми квантовыми состояниями с изменением толщины пленки Cu происходит с периодом 5—6 монослоев [12]. Схематическая иллюстрация взаимодействия между магнитными моментами в соседних слоях магнитных металлов посредством квантовых состояний, формируемых в слое немагнитного металла (б).

щеплены по спину и характеризуются различной энергией связи. Пики квантовых состояний, соответствующие различным направлениям спина, изображены светлыми и темными значками. При толщинах слоев Cu(100) ~4–5 и 9–10 монослоев пики квантовых состояний с обоими направлениями спинов располагаются вблизи уровня Ферми. Вследствие различного их энергетического положения заселенность состояний с разным направлением спина становится различной, и система может приобретать некоторый нескомпенсированный спиновый момент.

Изменения энергий спин-поляризованных квантовых состояний в системе Cu(100)/Co(100) на рис.7 сопоставлены с изменением заселенности состояний на уровне Ферми и величиной их спиновой поляризации (см. для сравнения изменения энергий пиков квантовых состояний, измеренных методом спин-интегрированной фотоэмиссии на рис.5,а) [9]. Для всех энергий связи квантовые состояния являются энергетически расщепленными по спину (рис.7,а). Однако в том случае, когда квантовые состояния находятся ниже уровня Ферми, их заселенность остается практически одинаковой. В результате вклад различных спиновых состояний компенсируется и суммарный спин системы равен нулю. При определенной толщине, когда спин-поляризованные квантовые состояния пересекают уровень Ферми, вклады различных спиновых состояний (одни находятся чуть ниже, а другие — чуть выше уровня Ферми) уже не компенсируются (вследствие их различной заселенности). Именно этот нескомпенсированный спиновый момент, обусловленный состояниями на уровне Ферми, способен осуществлять взаимодействие между слоями магнитных металлов, которые также характеризуются нескомпенсированными спиновыми моментами, определяющими величину их магнитного момента. Сравним зависимость модуляции плотности состояний вблизи уровня Ферми при изменении толщины слоя Cu (рис.7,б) и соответствующее изменение суммарной спиновой поляризации этих состояний (рис.7,в). При тех толщинах, когда квантовые состояния в слое Cu(100) «в среднем» находятся на уровне Ферми, величина нескомпенсированной спиновой поляризации состояний оказывается максимальной. И как раз благодаря этому дисбалансу осуществляется резонансное взаимодействие между магнитными моментами (спиновыми состояниями) в соседних слоях магнитных металлов (см. рис.5,б).

Поскольку квантовые состояния представляют собой стоячие электронные волны (см. рис.2), спиновая поляризация квантовых состояний, индуцированная на одной из границ слоистой системы (Co/Cu или Cu/Co), передается резонансным образом к другой границе, что и приводит к коррелированному магнитному взаимодействию ферромагнитного типа в соседних магнитных

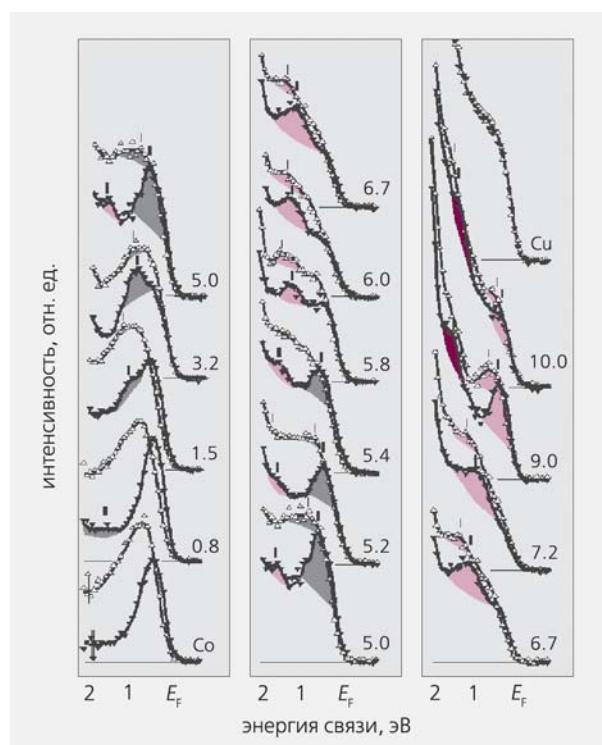


Рис.6. Спектры квантовых состояний с различным направлением спина для тонких слоев Cu(100) на поверхности Co(100) в зависимости от толщины (МС) слоя Cu, измеренные методом фотоэлектронной спектроскопии с разрешением по спину. Светлые и черные значки соответствуют различным направлениям спина. Толщина пленки Cu указана справа от спектров в единицах монослоев [10, 11].

слоях. Итак, при этих толщинах слоев Cu(100) имеет место ферромагнитное упорядочение между магнитными слоями (см. первый и третий случаи с рис.1,в).

При тех же толщинах слоев Cu, когда квантовых состояний на уровне Ферми нет, вклад состояний с различным направлением спина компенсируется, величина спиновой поляризации состояний на уровне Ферми равна нулю, и условий для резонансного взаимодействия между магнитными слоями нет. На каждой из границ контакт с магнитными слоями по-прежнему приводит к спиновой поляризации квантовых состояний в слое Cu. Но из-за общей компенсации заселенностей состояний с различным направлением спина спиновая поляризация определенного направления, формирующаяся на одной из границ, должна быть скомпенсирована поляризацией противоположного направления на другой границе. Это означает, что при отсутствии квантовых состояний на уровне Ферми взаимодействие между слоями становится антиферромагнитного типа.

Возможно объяснение этого явления с позиций волн спиновой плотности [5, 19]. Контакт

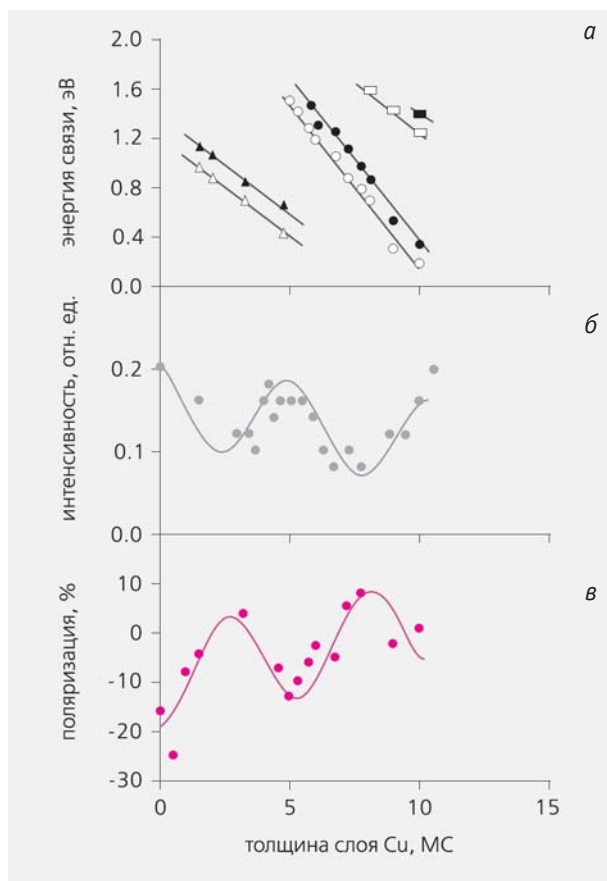


Рис. 7. Взаимосвязь между пересечением квантовыми состояниями уровня Ферми и величиной их спиновой поляризации [9]. Изменение энергий спин-поляризованных квантовых состояний по мере роста толщины слоя Cu на поверхности Co(100) (а). Величина спинового расщепления приблизительно постоянна для всех энергий квантовых состояний. Модуляция интенсивности состояний на уровне Ферми, указывающая на пересечение квантовыми состояниями уровня Ферми с периодом 5—6 монослоев (б). Максимумы соответствуют толщинам, при которых квантовые состояния находятся на уровне Ферми. Соответствующая величина спиновой поляризации электронных состояний на уровне Ферми, коррелирующая с периодом пересечения квантовыми состояниями уровня Ферми (в).

с ферромагнитным металлом индуцирует в немагнитном металле волны спиновой плотности, характеризующиеся осцилляцией направления некомпенсированного спина вдоль слоя немагнитного металла от одного слоя ферромагнетика к другому. Длина волны этих спиновых осцилляций равна половине длины волны электронов на уровне Ферми. В случае локализации квантовых состояний на уровне Ферми каждому полупериоду волновой функции квантовых состояний соответствует четное число полупериодов волн спиновых осцилляций. В результате формирующиеся

волны спиновой плотности индуцируют одинаковое направление спиновых моментов в соседних магнитных слоях. В интервале толщин, для которых квантовых состояний на уровне Ферми нет, поперек немагнитного слоя укладывается нечетное число полупериодов волн спиновых осцилляций, что создает противоположное направление спиновых моментов в соседних магнитных слоях, т.е. антиферромагнитный тип взаимодействия.

Спин спину рознь: резонанс магнитосопротивления

Проанализируем теперь, как возможность формирования квантовых состояний на уровне Ферми зависит от общей спиновой электронной структуры системы и взаимной ориентации спиновых моментов в соседних слоях магнитных металлов. Рассмотрим дисперсионные зависимости электронных состояний для магнитного металла (Fe(100)), характерные для различных направлений спина и приведенные на рис.8,а [14]. Здесь же показана соответствующая область валентных *sp*-состояний Ag(100), из которых формируются квантовые состояния. Тот факт, что край валентной зоны находится выше уровня Ферми, подразумевает: при определенных толщинах формируемые квантовые состояния пересекают уровень Ферми (как на рис.5 для слоя Cu(100)). Благодаря этому для системы Fe(100)/Ag(100)/Fe(100) также характерны эффекты модуляции магнитных свойств. На представленной спиновой электронной структуре для Fe(100) темным цветом показаны зоны состояний, которые не взаимодействуют с *sp*-состояниями Ag. Эти области могут быть рассмотрены как энергетические зоны, куда не проникают волновые функции *sp*-состояний из слоя Ag, т.е. как аналог зон запрещенных состояний. Для состояний «спин-вверх» (т.е. состояний основной спиновой направленности — «majority spin») край такой запрещенной зоны располагается при энергиях на ~0.8 эВ ниже уровня Ферми, а для состояний «спин-вниз» («minority spin») — при энергиях на ~1.2 эВ выше уровня Ферми. Таким образом, только относительная запрещенная зона для состояний «спин-вниз» обеспечивает возможность потенциального ограничения волновых функций на уровне Ферми для *sp*-состояний в слое Ag. На потенциальных диаграммах рис.8,б—д показаны энергетические положения запрещенной зоны для различных возможных комбинаций направлений спина в соседних магнитных слоях. Видно, что только для одной комбинации взаимного расположения спинов (направления «спин-вниз» в обоих слоях, см. рис.8,в) существуют условия для ограничения волновых функций электронных состояний в слое Ag на уровне Ферми, а, следовательно, для формирования соответствующих спектров квантовых состо-

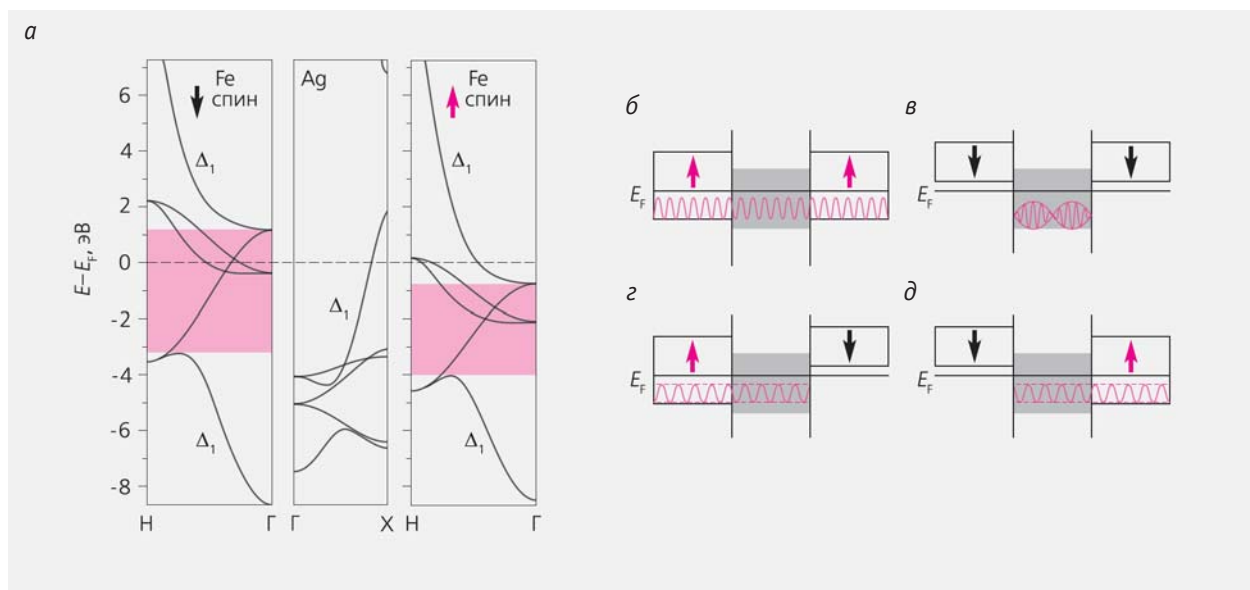


Рис.8. Детальная электронная структура состояний в Fe(100) для различных направлений спина (а). Цветом показаны области состояний, которые могут быть рассмотрены в качестве запрещенной зоны, позволяющей ограничить распространение электронных волн в слое размерами пленки Ag(100), что приводит к формированию квантовых состояний в данной пленке [14]. Для различных направлений спина положение запрещенной зоны в электронной структуре Fe(100) различно. Здесь же показано положение зоны валентных состояний для Ag(100), из которых формируются квантовые состояния. Символы ГН и ГХ обозначают направления в элементарной ячейке Fe и Ag в импульсном пространстве (в зоне Бриллюэна), соответствующие направлению [100]. Влияние различных комбинаций взаимного расположения спиновых моментов в соседних слоях магнитных металлов на возможность формирования квантовых состояний на уровне Ферми (б–д). Формирование квантовых состояний возможно только для одной комбинации спиновых направлений (параллельная ориентация состояний «спин-вниз», вверху справа).

ний. Для любых других комбинаций взаимных спиновых ориентаций условия для формирования квантовых состояний на уровне Ферми отсутствуют. Следовательно, нет и условий для скоррелированного взаимодействия между магнитными слоями. Наличие или отсутствие квантовых состояний на уровне Ферми (рис.8,б,в), или, что то же, наличие потенциальных барьеров (рис.8,г,д) для прохождения электронных волн через систему приводит к изменению соответствующего электрического тока, который определяется эффективной величиной электрического сопротивления. Исходя из этого можно сделать вывод: электрическое сопротивление системы также зависит от комбинации взаимных ориентаций спинов в соседних магнитных слоях. Причем если менять взаимную ориентацию спиновых моментов в слоях магнитных металлов (например, приложением внешнего магнитного поля), то можно изменять соответствующим образом условия прохождения электронных волн, или, другими словами, величины электрического сопротивления. Процессы такого типа как раз и лежат в основе эффектов гигантского резонанса магнитного сопротивления. Обычно эти эффекты имеют место для слоистых систем, у которых в исходном состоянии (без приложенного маг-

нитного поля) соседние магнитные слои связаны антиферромагнитно, т.е. их спиновые моменты ориентированы в противоположных направлениях. Такого типа взаимодействие возможно для слоистых систем, где в качестве прослойки между ферромагнитными металлами используются слои Cr определенной толщины. В соответствии с анализом, проведенным выше, система с противоположной взаимной ориентацией спиновых моментов в соседних магнитных слоях характеризуется высоким сопротивлением. Если к системе приложить достаточно сильное внешнее магнитное поле, все спиновые моменты в магнитных слоях будут ориентированы в одном направлении. Это приведет к смене типа взаимодействия на ферромагнитное, которое уже характеризуется низким электрическим сопротивлением. Таким образом, приложение магнитного поля к данной системе приведет к соответствующему резкому уменьшению сопротивления, о чем подробнее говорилось в статье [4]. Здесь подчеркнем только, что максимального изменения сопротивления следует ожидать при тех толщинах пленки промежуточного слоя металла (Cr), когда на уровне Ферми располагаются квантовые состояния. При тех толщинах, когда квантовых состояний на уровне Ферми нет, перепад величины сопротивления

при приложении магнитного поля будет существенно меньше. Таким образом, перепад в величине магнитосопротивления будет зависеть от толщины промежуточного слоя немагнитного металла, осциллируя с периодом прохождения квантовыми состояниями уровня Ферми (подобно тому, как это представлено на рис.1,2).

* * *

Таким образом, именно эффекты спиновой поляризации квантовых состояний и наличие

или отсутствие этих состояний на уровне Ферми при разных толщинах слоев немагнитных металлов и определяют модуляцию магнитных свойств слоистых магнитных металлических систем. Эти эффекты уже сейчас активно используются при разработке устройств записи и считывания информации в компьютерах нового поколения и других устройств наноэлектроники (спиновых ключей, спиновых инжекторных устройств и т.п.), интенсивно развивающейся в последнее время. ■

Литература

1. *Ферт А.* // УФН. 2008. V.178. С.1336—1348.
2. *Gruenberg P.* // Ann. Phys. 2008. V.17. P.7—16; Грюнберг П.А. // УФН. 2008. V.178. С.1349—1358.
3. *Wolf S.A., Awschalom D.D., Daughton J.M. et al.* // Science. 2001. V.294. P.1488—1495.
4. *Никитов С.А.* Лауреаты Нобелевской премии 2007 года по физике — А.Фер и П.Грюнберг // Природа. 2008. №1. С.68—74.
5. *Himpfel F.J., Ortega J.E., Mankey G.J. et al.* // Adv. Phys. 1998. V.47. P.511—597.
6. *Qiu Z.Q., Pearson J., Bader S.D.* // Phys. Rev. B. 1992. V.46. P.8659—8662.
7. *Ortega J.E., Himpfel F.J.* // Phys. Rev. Lett. 1992. V.69. P.844—847.
8. *Parkin S.S.P., Farrow R.F.C., Marks R.F. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1994. V.72. P.3718—3721.
9. *Carbone C., Vescovo E., Rader O. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1993. V.71. P.2805—2808.
10. *Carbone C., Vescovo E., Klaesges R. et al.* // Solid State Commun. 1996. V.100. P.749—753.
11. *Carbone C.* // Поверхность. 1998. V.8—9. С.187—192.
12. *Ortega J.E., Himpfel F.J., Mankey G.J. et al.* // Phys. Rev. B. 1993. V.47. P.1540—1552.
13. *Mulin M., Pervan P., Woodruff D.P.* // Rep. Progr. Phys. 2002. V.65. P.99—141.
14. *Smith N.V., Brookes N.B., Chang Y. et al.* // Phys. Rev. B. 1994. V.49. P.332—338.
15. *Shikin A.M., Rader O., Prudnikova G.V. et al.* // Phys. Rev. B. 2002. V.65. P.075403(1—10).
16. *Шикин А.М., Адамчук В.К.* // ФТТ. 2008. V.50. С.1121—1137.
17. *Varykhalov A., Shikin A.M., Gudat W. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2005. V.95. P.247601(1—4).
18. *Shikin A.M., Visman M.B., Vladimirov G.G. et al.* // Surf. Sci. 2006. V.600. P.2681—2687.
19. *Stoehr J., Siegmann H.C.* Magnetism from Fundamentals to Nanoscale Dynamics // Ed. M.Cardona. et al. Berlin; Heidelberg, 2006.

Поправка

В статье А.В.Бялко «Палеоклимат: дополнения теории Миланковича», опубликованной в №12 за 2009 г., замечены опечатки. На с.18 имя Миланковича следует читать: Милутин. В формуле на с.19 пропущен коэффициент 4. Правильный вид формулы: $T_{\text{rad}} = [W_0(1 - A_0)/4\sigma]^{1/4}$. Вычисленная температура $T_{\text{rad}} = 255$ К верна.

Планктомицеты: загадочные красавцы из мира бактерий

С.Н.Дедыш, И.С.Куличевская

«**Н**у какая может быть красота у этих одноклеточных организмов? Палочки да кокки: вот вам и все красоты», — скажет неискушенный читатель и будет неправ. Со времени изобретения микроскопа Левенгуком мир бактерий не перестает поражать человека своим разнообразием. На протяжении нескольких столетий основным инструментом познания мира микробов служил микроскоп. С его помощью можно было оценить морфологию и размеры микробных клеток, их подвижность, способы деления, наличие пигментов, т.е. основные характеристики, которые микробиологи использовали для классификации бактерий. Зрительные образы позволяли микробиологам начала XX в. достаточно уверенно отличать бактерий от других представителей микромира, таких как микроскопические грибы, водоросли и простейшие. Но случались и конфузы, когда микроорганизмы вводили микробиологов в заблуждение своей необычной, ранее невиданной морфологией клеток. Об одной из таких групп бактерий, а именно о планктомицетах и пойдет речь.

В 1924 г. венгерский микробиолог Гимези при анализе проб воды пресноводного водоема увидел поразительный микроорганизм (рис.1,*a*), который,

© Дедыш С.Н., Куличевская И.С., 2010



Светлана Николаевна Дедыш, доктор биологических наук, заведующая лабораторией микробиологии болотных экосистем Института микробиологии им.С.Н.Виноградского РАН. Область научных интересов — микробное разнообразие в северных болотных экосистемах, микробные агенты окисления метана и деструкция биополимеров в болотах, а также функции малоизученных групп бактерий.



Ирина Сергеевна Куличевская, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник той же лаборатории. Занимается экологией микроорганизмов.

несмотря на многочисленные попытки микробиологов, до сих пор не удастся культивировать в лаборатории, а значит, и не удастся изучить его свойства. Более того, для него пока неизвестна и нуклеотидная последовательность гена, кодирующего 16S рибосомальную РНК. В современной филогенетической классификации бактерий 16S рРНК используется в качестве «молекулярного паспорта» каждого организма. Однако имя

у этого «красавца без паспорта» все же имеется — *Planctomyces bekefii*. Назван он так потому, что Гимези ошибочно классифицировал его как планктонный гриб и использовал корень «myses» в названии рода.

Позднее подобные организмы описывали и многие другие микробиологи, давая им различные имена, например *Blastocaulis sphaerica* или *Gallionella planctonica*. Путаницы, к счастью, удалось избежать, и в 1972 г.

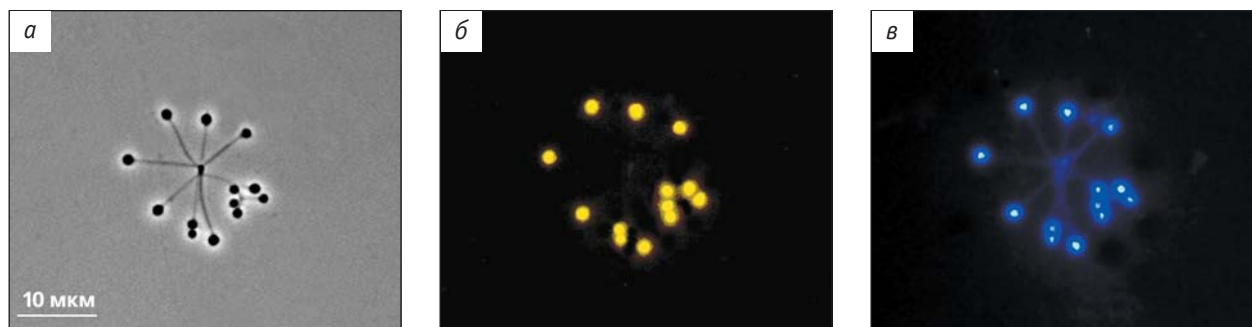


Рис.1. Розетки *Planctomyces bekefii* — наиболее загадочного представителя планктомицетов, которого пока не удается культивировать. Это современная фотография, полученная в нашей лаборатории при анализе воды эвтрофного озера Хотавец Вологодской обл. а — в фазовом контрастном микроскопе, б — флуоресцентная микрофотография гибридизации с зондом PLA46, в — окраска ДНК-специфичным красителем ДАФИ.

Здесь и далее фото авторов

все эти таксономические объекты объединили под именем *Planctomyces bekefii*. Впоследствии составили морфологические описания и нескольких других планктонных разновидностей этого рода, формирующих розетки: *Pl.crasus*, *Pl.stranskae*, *Pl.gracilis* и *Pl.guttaeformis*. Ни один из этих организмов до сих пор не получен в культурах. Некоторые из них, типа *Pl.crasus*, первоначально были определены как грибы, а другие описаны как бактерии. Спор относительно природы этих загадочных существ окончательно разрешился только в 1980 г. Тогда с помощью электронной микроскопии проанализировали ультратонкие срезы клеток *Planctomyces bekefii* из венгерских и североамериканских озер — клетки не имели оформленного ядра, что характерно для прокариотных микроорганизмов, т.е. для бактерий [1].

От культивирования к разнообразию

В 1973 г. американский микробиолог Дж.Стэйли сумел подобрать ключ к культивированию планктомицетов в лаборатории — он использовал для их выделения разбавленные питательные среды [2]. Оказалось, что очень многие природные бактерии попросту не способны развиваться на богатых питательных средах, которые тогда

использовали микробиологи. Пословица «маслом кашу не испортишь» здесь оказалась неуместной. В этом, впрочем, нет ничего удивительного. В большинстве природных местообитаний концентрация доступного микровам субстрата не превышает нескольких миллиграмм в литре воды, тогда как в лабораторных питательных средах обычно содержится граммы этого субстрата. Выдержать такой шок и расти на столь богатой среде способен лишь относительно узкий круг микроорганизмов, которые давно и хорошо изучены микробиологами. Рост же большинства других бактерий, в том числе планктомицетов, на таких средах невозможен.

Осознание этого факта вызвало прорыв в культивировании ранее ускользавших от микробиологов бактерий. С середины 70-х до конца 80-х годов XX в. десятки изолятов планктомицетов были успешно получены в культурах. Однако *Planctomyces bekefii* удалось ускользнуть и на этот раз, иначе мы бы не называли его загадочным. Выделены были и другие планктомицеты, несколько менее экзотичной морфологии. Одни из них имели тонкие стебельки, посредством которых клетка прикреплялась к субстрату (род *Planctomyces*), вторые выглядели как длинные ожерелья из шаровидных клеток (род *Iso-*

sphaera), третьи формировали красивые розетки (род *Pirellula*), а клетки четвертых походили на эритроциты (род *Gemmata*). Эти организмы стали исследовать в лаборатории и изучать их свойства.

Как же удалось понять, что все эти морфологически различные бактерии относятся к одной и той же группе? Прежде всего заметили, что они обладают одним и тем же типом деления — почкованием. Изучение структуры клеточной стенки этих организмов выявило отсутствие пептидогликана — одного из основных компонентов клеточной стенки подавляющего большинства известных бактерий, за исключением микоплазм и хламидий. В конце 80-х годов XX в. была введена филогенетическая систематика бактерий, основанная на сравнительном анализе нуклеотидных последовательностей генов рРНК. В отношении планктомицетов этот анализ показал, что они представляют отдельную, филогенетически обособленную, ветвь домена Bacteria, которая получила свое название от первого описанного ее представителя — *Planctomycetes* [3, 4]. При сравнении известных к настоящему времени нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК выяснилось, что ближайшие родственники планктомицетов на филогенетическом древе бактерий — филумы *Verrucomic-*

robia, *Chlamydiae*, *Lentisphaerae*, а также группы-кандидаты Poribacteria и ОРЗ [5]. Вместе они образуют суперфилум PVC — *Planctomycetes/Verrucomicrobia/Chlamydiae* (рис.2).

Чем еще, помимо почкования и отсутствия пептидогликана, замечательны планктомицеты? Несмотря на принадлежность к бактериям, клетки планктомицетов имеют достаточно сложное строение [6]. Система мембран делит клетку на отсеки (или компартменты), в одном из которых содержится фибриллярный нуклеоид и большая часть рибосом (рис.3). Эта часть клетки получила название «рибоплазма». В 1991 г. опубликовали еще более поразительное наблюдение: у планктомицетов рода *Gemmata* нуклеоид окружен двухслойной мембраной [7], что присуще только клеткам эукариотных организмов. Однако это сообщение не получило единодушного признания мировым научным сообществом, и в настоящее время проверка этого факта продолжается с помощью новейших методов анализа. Размеры геномов планктомицетов — одни из самых крупных в мире бактерий (до 9 млн пар оснований). Примечательно также, что существенная доля генов в них (до 10–15%) обнаруживают наибольшее сходство не с генами других бактерий, а с генами архей и эукариот, т.е. двух других царств микроорганизмов.

Начальные представления о метаболическом и физиологическом разнообразии планктомицетов сформировались на основе изучения свойств бактерий, полученных в чистых культурах. Все они аэробные хемоорганотрофы, т.е. используют в качестве источников углерода и энергии органические соединения. Излюбленные ростовые субстраты таких планктомицетов — различные сахара и N-ацетилглюкозамин. Но так ли однообразны все существующие планктомицеты в отношении своих субстратных предпочте-

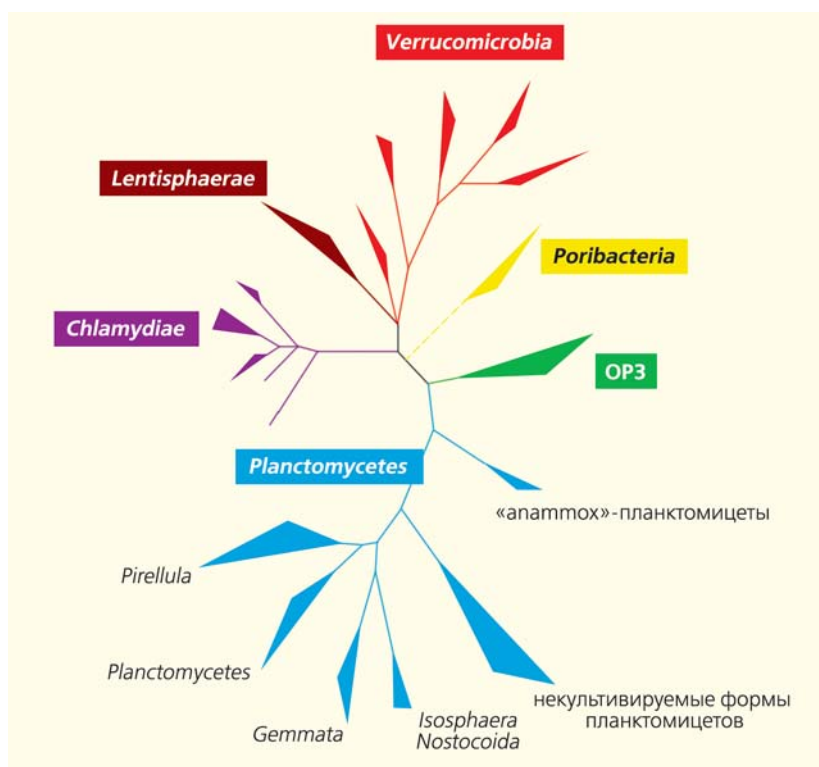


Рис.2. Филогенетическая дендрограмма, построенная на основе сравнительного анализа нуклеотидных последовательностей генов 16S рННК, показывающая положение планктомицетов в составе суперфилума PVC (*Planctomycetes/Verrucomicrobia/Chlamydiae*). Различные филогенетические группы бактерий показаны различными цветами [5].

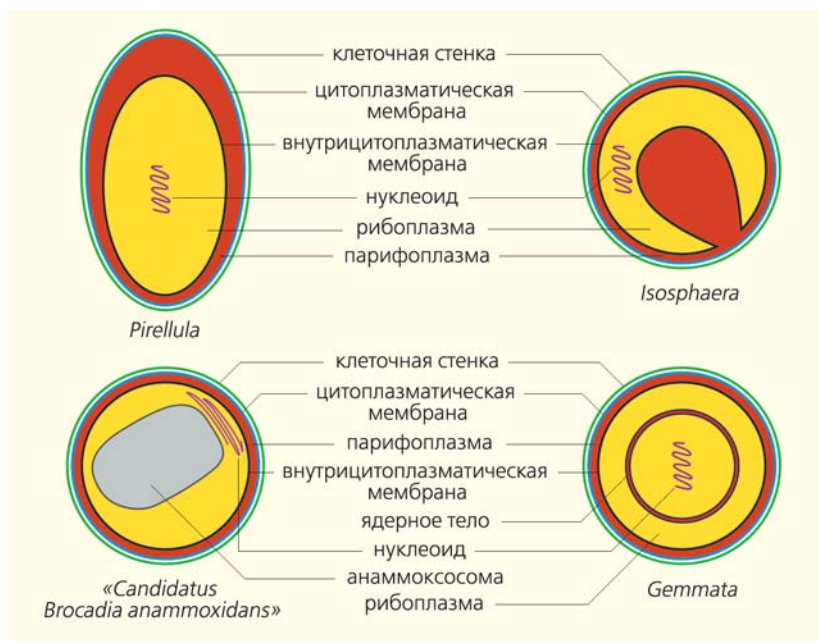


Рис.3. Схема организации клеток планктомицетов, показывающая четыре основных типа компартментализации клеток, встречающиеся у этих бактерий, на примере представителей родов *Pirellula*, *Isosphaera*, *Gemmata* и «anamмоx»-планктомицетов [6].

ний и типа метаболизма? Оказалось, что они гораздо разнообразнее, чем наши представления о них. Продемонстрировано это было на границе двух столетий, в 1999 г., когда в «Nature» вышла сенсационная статья голландских ученых об открытии анаэробных автотрофных планктомицетов, способных осуществлять анаэробное окисление аммония, — «*anammox*» [8].

Первоначально эти организмы были обнаружены в очистных биореакторах, но дальнейшие исследования с применением молекулярных методов выявили их широкое распространение в морских водоемах и эстуариях. «*Anammox*»-планктомицетов до сих пор не удалось выделить в чистой культуре. Их получили лишь в виде сильно обогащенных культур. Однако это не помешало достаточно детально изучить физиологию и метаболизм этих организмов, а также определить нуклеотидные последовательности их геномов. Таким образом, сегодня известны две основные, метаболически различные группы планктомицетов — аэробные хемоорганотрофы и анаэробные «*anammox*»-планктомицеты. Исчерпывают ли они все существующее в природе метаболическое разнообразие этой группы бактерий? Скорее всего, нет, так как, по сравнению с другими микроорганизмами, населяющими природные экосистемы, планктомицеты еще очень слабо изучены.

«Да полно вам, — возразит читатель, — это всего лишь какие-то экзотические бактерии. Если бы их было действительно много в природе, мы бы давно знали об этом!» Ирония в том, что здесь в качестве оппонента может выступить не только неискушенный читатель, но и дипломированный микробиолог. Такую реакцию легко понять. В учебниках о планктомицетах ничего (или почти ничего) не написано, на рутинно применяемых питательных средах эти бактерии не растут, а в микро-

скопе можно безошибочно опознать лишь *Planctomyces bekefii*. В самом деле, трудности культивирования планктомицетов долгое время сдерживали накопление знаний об их распространении в природных экосистемах. Считалось, что планктомицеты типичны лишь для водных местообитаний.

Новые методы — новые успехи

Ситуация коренным образом изменилась с введением в практику молекулярных методов, позволяющих идентифицировать микроорганизмы в образцах природных сред без их культивирования. Хотя этими методами анализируют нуклеиновые кислоты (ДНК и РНК), экстрагированные из исследуемых образцов, они, как это ни парадоксально, «открыли глаза» микробиологам на существующее в природе микробное разнообразие. Оказалось, что оно неизмеримо выше изученного ранее с помощью культуральных методов анализа. По данным молекулярного анализа, малоизвестные или совсем неизвестные группы микроорганизмов вдруг оказались весьма многочисленными или даже численно доминирующими в различных экосистемах. Один из таких примеров — планктомицеты. Их нуклеотидные последовательности генов 16S рРНК были обнаружены повсеместно: в различных почвах, на скальных микробиоценозах, аэробных и анаэробных осадках, воде пресноводных и морских экосистем, в очистных биотехнологических сооружениях, в тесных ассоциациях с губками и ракообразными и во многих других нишах [9]. Разнообразие этих последовательностей и их отличие от таковых у ранее изученных планктомицетов доказывало, что наши знания о разнообразии *Planctomyces* — лишь небольшая надводная часть гигантского айсберга.

Продвинуться еще далее в исследовании экологии планктомицетов удалось после введения в микробиологическую практику метода FISH (fluorescent in situ hybridization) — гибридизации с рРНК-специфичными флуоресцентно-мечеными олигонуклеотидными зондами. Метод совмещает возможности идентификации и определения численности отдельных филогенетических групп микроорганизмов в любых образцах — в воде, почве, торфе и т.д. Неоспоримое достоинство метода FISH — возможность прямого наблюдения целевых микроорганизмов, оценки их морфологии и численности, а также изучения особенностей микролокализации в природных субстратах.

Зонды могут иметь специфичность различного ранга, которая определяется интересами конкретного исследования. Так, для детекции какого-то конкретного вида бактерий подходит зонд видовой уровня, а для определения всех представителей домена Bacteria — зонд максимально широкой специфичности. Для представителей планктомицетов разработали соответствующий зонд — PLA46 [10], позволяющий выявлять всех представителей этой группы бактерий, от полученных в культурах аэробных хемоорганотрофных планктомицетов до анаэробных «*anammox*»-планктомицетов. С помощью PLA46 установлено, что планктомицеты могут составлять до 5% общей численности микробных клеток в водных экосистемах и в активированном иле. В почвах же их численность достигает нескольких миллиардов клеток в 1 г сухой почвы, составляя до 7% общего числа микробных клеток и 18% общего числа бактерий.

Мы использовали зонд PLA46 для выявления планктомицетов в воде эвтрофного озера (рис.4). Для сравнения приведены фотографии наблюдаемых объектов с помощью обычного фазового контраста (рис.4,*a*) и в ультра-

фиолетовом свете (рис.4,б), когда видны только связавшиеся с зондом клетки. Розетки клеток желто-оранжевого цвета принадлежат одному из некультивируемых, но описанных по натурным наблюдениям *Planctomyces guttaeformis*. На полученных флуоресцентных микрофотографиях не светятся стебельки, которые видны при наблюдении в фазовом контрастном микроскопе. Причина в том, что зонд связывается с рРНК, которая локализуется только в самих клетках, в «рибоплазме»; в стебельках же рРНК нет. Более того, зачастую светится не вся клетка, а только ее часть, что подтверждает локальное сосредоточение нуклеиновых кислот в клетках планктомицетов. Не правда ли, искать планктомицетов, вооружившись методом FISH, дело достаточно увлекательное?

Болотные обитатели

Мы изучали микробное сообщество сфагновых болот бореальной и тундровой зон Северного полушария. Эти наземные экосистемы широко распространены в Северной Европе, Канаде и на севере США, но наиболее обширны они (161 млн га) в России, где составляют до 80% территории некоторых регионов. Болотные экосистемы играют важнейшую роль в глобальном цикле углерода: они служат стоком CO₂ и источником CH₄, двух наиболее активных парниковых газов. Болота, расположенные в области питания рек, определяют их гидрологический цикл, а микробиологические процессы, протекающие в болотах, оказывают определяющее влияние на химический состав воды (рис.5). Ультрапресные воды, в которых содержание солей не превышает 5–50 мг/л, формируются в верховых сфагновых болотах, где высокая кислотность (рН 3.5–5.0), низкие температуры, мало кислорода и много фенольных соединений

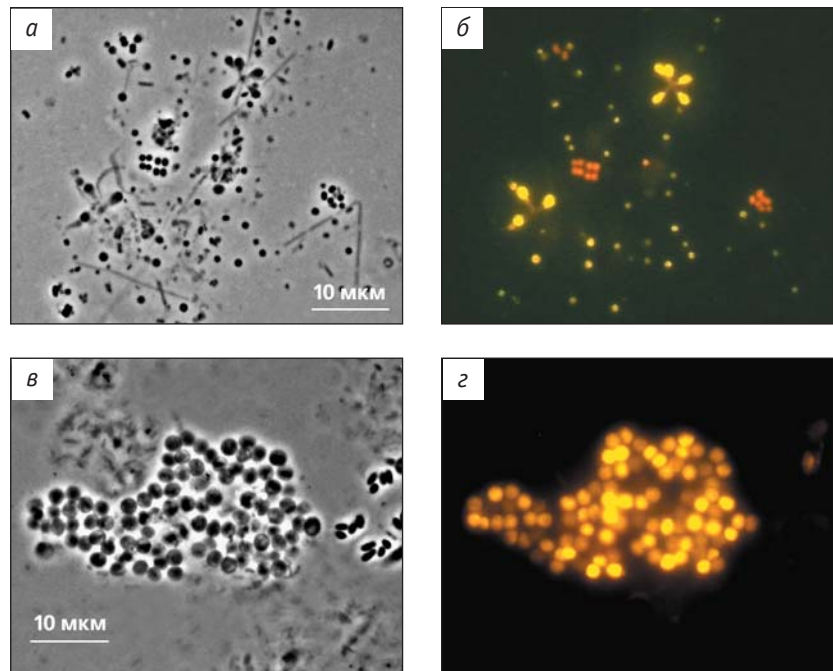


Рис.4. Гибридизация *in situ* микробных сообществ воды эвтрофного озера (а, б) и сфагнового торфа (в, з) с 16S рРНК-специфичным флуоресцентно-меченым зондом PLA46. а и б — вид в фазово-контрастном микроскопе; в и з — флуоресцентные микрофотографии гибридизации с зондом PLA46. Клетки планктомицетов, связавшиеся с зондом, светятся желто-оранжевым цветом; хлорофиллсодержащие клетки фотосинтезирующих микроорганизмов — красным.

(они образуются при разложении сфагнома, главного компонента фитоценозов этих экосистем). Таким образом, северные болота — важнейший природный центр формирования и крупнейший резервуар ультрапресных вод на планете. Микроорганизмы же, населяющие эти экосистемы, до последнего времени оставались почти неизученными, поскольку подавляющее большинство их не удавалось культивировать с использованием обычных для микробиологической практики подходов.

В исследовании уникального микробного сообщества сфагновых болот мы применили сочетание молекулярных и культуральных методов. С помощью первых идентифицировали компоненты микробного сообщества и определяли их численность, а благодаря вторым (культуральным) получали изоляты численно репрезентатив-

ных групп организмов и изучали их метаболизм. Одним из главных инструментов в нашей работе был метод FISH. С помощью зонда PLA46 в сфагновом торфе обнаружили многочисленные клетки планктомицетов, большая часть которых располагалась на агрегатах полуразложившегося органического вещества [11]. Морфология этих клеток варьировала от шаровидной до эллипсоидной, значительная их часть была собрана в микроколонии (рис.4,в–з). Яркая флуоресценция болотных планктомицетов свидетельствовала о высоком содержании рРНК и об их активном физиологическом состоянии.

Планктомицеты присутствовали в образцах воды и торфа болот различного географического расположения — как Западной Сибири, так и севера европейской территории России. Их численность достигала де-



Рис.5. Типичные обитатели сфагнового болота: слева — ковер из сфагнома; справа — росянка [8].

сятков миллионов клеток в 1 г сырого торфа, что составляло до 13% общей численности бактерий, выявляемых в торфе методом FISH [12]. Так впервые было показано, что планктомицеты — важный компонент микробного сообщества сфагновых болот. В чем же, собственно, состояла неожиданность этой находки? В том, что все ранее полученные в культурах и охарактеризованные планктомицеты были нейтрофильными организмами, растущими в нейтральном или слабощелочном диапазоне значений pH (6–8.5). Но в сфагновых болотах — кислая среда (pH 3.5–5.5), тогда как планктомицеты, способные развиваться в таких условиях, ранее были неизвестны. Чем не увлекательная загадка для микробиолога, пытающегося проникнуть в один из уголков мира неизвестных микробов?

В нашей работе по выделению культур болотных планктомицетов путеводной нитью стал тот же метод FISH. Он не только позволил увидеть этих микроорганизмов в торфе, но и помог обнаружить клетки нужных нам бактерий в накопительных культурах, куда засевался природный материал. Через три-четыре недели инкубации в таких культурах образовались многокомпонентные микробные пленки обрастания, в которых активно развивались и представители

Planctomycetes. В препаратах пленок, гибридизованных с зондом PLA46, наблюдались ярко-светящиеся скопления клеток и микроколонии планктомицетов. Идентифицировать этих бактерий только на основании морфологических критериев крайне затруднительно, так как в образцах присутствовали не только клетки планктомицетов различной формы и размера, но также и ряд других, морфологически сходных, организмов. В момент массового развития планктомицетов в какой-либо из накопительных культур материал пленок обрастания рассевали на агаризованные среды с очень низким содержанием доступного субстрата. Скрининг колоний, формирующихся на поверхности сред, проводили также с привлечением метода FISH. После длительной (до нескольких месяцев) инкубации на средах появлялись очень мелкие (0.2–1 мм) колонии планктомицетов, выявляемые только с помощью бинокулярной лупы. Обычно внимания микробиологов удостоиваются лишь быстрорастущие бактерии, которые формируют сравнительно крупные (несколько миллиметров в диаметре) колонии за одну-две недели инкубации. Неудивительно, что планктомицеты довольно долго имели репутацию «некультивируемых» микроорганизмов.

Поиски новых видов

В результате такой кропотливой работы в сочетании с мониторингом всех этапов методом FISH удалось успешно выделить 10 штаммов планктомицетов. По морфологии клеток их можно легко разделить на три группы. Планктомицеты первой группы имели клетки овальной формы размером 1.8–2.1×0.9–1.4 мкм, которые в ряде случаев были организованы в кистевидные скопления (рис.6,а). Изоляты второй группы были представлены сферическими клетками диаметром 1.6–2.5 мкм (рис.7,а), тогда как единственный изолят третьего морфотипа имел клетки эллипсоидной формы размером 2.5–3.2×2.0–2.5 мкм, которые были собраны в крупные розетки (рис.8,а). В отличие от всех ранее известных планктомицетов, болотные изоляты росли в диапазоне pH от 4.2 до 7.2, т.е. были умеренными ацидофилами. Итак, настало время точно идентифицировать полученных с таким трудом микроорганизмов! Определение нуклеотидных последовательностей гена 16S рПНК показало, что все болотные изоляты принадлежат к группе *Planctomycetes*, но обнаруживают лишь очень низкое сходство нуклеотидных последовательностей гена 16S рПНК (около 90%) с таковыми у ранее известных планктомицетов, т.е.

представляют новые роды и виды этих бактерий.

Изоляты первой группы имели наибольшее филогенетическое родство с представителями рода *Planctomyces*, для которых характерно наличие тонких стебельков, прикрепляющих клетку к субстрату. У болотных же изолятов таких стебельков не оказалось. С помощью сканирующей электронной микроскопии обнаружили, что один из полюсов клетки имеет лимонovidный выступ и покрыт кратеровидными углублениями (рис.6,б). Такие структуры характерны для многих планктомицетов, но их функции пока еще неясны. Сравнение ряда характеристик (спектров используемых субстратов, наличия различных ферментов, температурного диапазона роста, устойчивости к солям, состава жирных кислот и др.) у новых изолятов и ранее описанных представителей рода *Planctomyces* подтвердило их существенное отличие. Это доказывало принадлежность болотных планктомицетов к новому роду, получившему название *Schlesneria*, в честь Хайнца Шлезнера. Этот немецкий микробиолог, посвятивший десятки лет своей жизни исследованию разнообразия планктомицетов, собрал самую крупную коллекцию этих микроорганизмов. Он был первым, кто выделил культуру планктомицета из небольшого сфагнового болота, расположенного в окрестностях Кили на севере Германии. До изучения свойств этого планктомицета дело, однако, не дошло, поэтому «титул» первых ацидофильных планктомицетов достался изолятам из российских болот [13]. Однако в дань уважения к трудам немецкого коллеги описанный нами новый род планктомицетов носит его имя. Видовой же эпитет нового микроорганизма — *paludicola* — означает «населяющий болота», что говорит о его природном местообитании.

Ближайшим филогенетическим родственником второй груп-

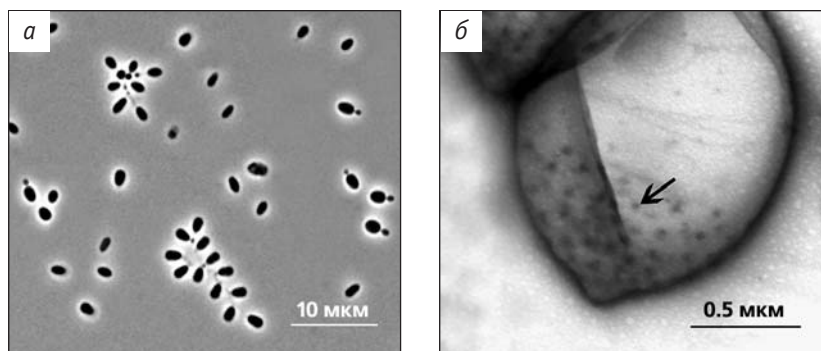


Рис.6. *Schlesneria paludicola* — первый ацидофильный планктомицет, выделенный из кислого сфагнового болота. а — в фазовом контрастном микроскопе. б — сканирующая электронная микроскопия (фото О.И.Баулиной). Стрелкой показаны кратеровидные структуры, характерные для клеток планктомицетов.

пы изолятов с шаровидными клетками (рис.7,а) оказался термофильный планктомицет *Isosphaera pallida*, выделенный в конце 80-х годов XX в. из горячего источника. Клетки этого микроорганизма также имеют шаровидную форму, но они собраны в длинные нити-ожерелья, которые способны к скользящему движению. Подобно тому, как *Planctomyces bekefii* ошибочно принимали за микроскопический гриб, *Isosphaera pallida* по микроскопическим наблюдениям изначально классифицировали как цианобактерию. Различие между нитчатым термофилом

Isosphaera pallida и нашими изолятами из северных болот было более чем очевидно. Неподвижные клетки болотных планктомицетов одиночные или образуют пары, но не нити. Они равномерно покрыты кратеровидными структурами и прикрепляются к поверхностям посредством фибриллярного материала, экскретируемого на полюсах клетки. Другие важные отличия — это неспособность к росту при высоких температурах (и, напротив, рост при низких температурах), ацидофилия, отсутствие пигмента, иной состав жирных кислот. Все это однозначно указывает на

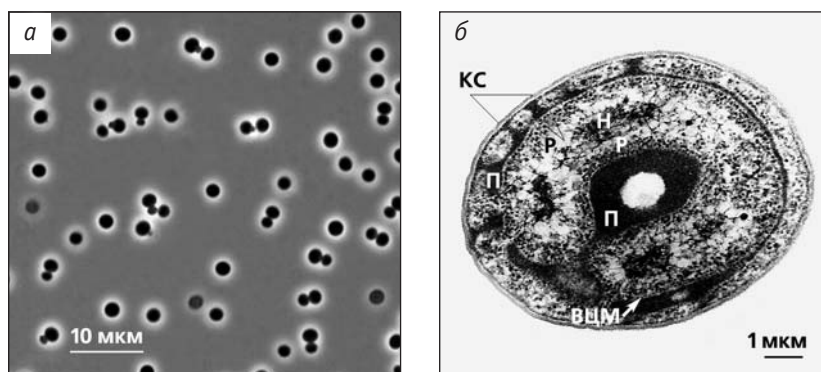


Рис.7. Болотный планктомицет *Singulisphaera acidiphila*. а — представители этого рода, особенно многочисленные в воде и торфе сфагновых болот. б — при наблюдении в фазовом контрастном микроскопе. Микрофотография ультратонкого среза клетки с многочисленными компартментами, образованными инвагинациями внутрицитоплазматической мембраны: КС — клеточная стенка, ВЦМ — внутрицитоплазматическая мембрана, Н — нуклеоид, Р — рибосомы, П — парифоплазма.

принадлежность болотных изолятов к новому роду и виду планктомицетов, который получил название *Singulisphaera acidi-diphila*, что означает «одиночная сферическая клетка, любящая кислую среду» [14].

Планктомицет третьего типа (рис.8,а) по своей удивительной морфологии более всех из выделенных нами новых планктомицетов напоминает *Planctomyces bekefii*. Безусловно, это совершенно другой организм. Однако наличие стебельков, соединяющих клетки в элегантные розетки, делает его похожим на тех загадочных планктомицетов, которые до сих пор остаются неуловимыми. Кстати, наш болотный изолят оказался весьма сложным в культивировании и медленно растущим организмом. Изучение его свойств потребовало более трех лет работы, но и до сих пор мы не разгадали все его секреты. Например, остается непонятной функция стебельков, имеющих сложное внутреннее строение (рис.8,б). Формируются они далеко не всегда, а только при длительном росте на чрезвычайно бедных питательных средах. В связи с этим одна из гипотез, касающихся функций стебельков, заключается в увеличении по-

верхности клетки за их счет для более эффективного поглощения субстратов. Скорее всего, эта гипотеза слишком проста для объяснения образования таких совершенно нетипичных для бактерий структур.

Определение нуклеотидной последовательности гена 16S рРНК этого болотного микроорганизма показало, что его ближайший (но все же очень далекий!) родственник — пресноводный планктомицет *Gemmata obscuriglobus*, а у него никогда не наблюдали стебельков или, тем более, формирования розеток. По другим характеристикам эти два микроорганизма также имели очень мало общего. Как и в двух предыдущих случаях, это послужило причиной описания нового рода и вида планктомицетов, получившего имя *Zavarzinella formosa* [15]. Родовой эпитет этому новому микроорганизму дан в честь одного из ведущих российских микробиологов, «охотника за микробами» с мировым именем Г.А.Заварзина. Он первый среди отечественных микробиологов обратил внимательный взгляд на интригующую и плохо изученную группу стебельковых почкующихся бактерий и свел воедино имеющиеся в литературе

данные и архивные зарисовки, выполненные первыми наблюдателями планктомицетов [16]. Видовой эпитет нового планктомицета — *formosa* — означает «красивый», с чем, мы надеемся, вы согласитесь.

Коль скоро речь зашла об описании новых родов и видов бактерий, поясним, что для этого требуется. Во-первых, у вас в руках должен быть микроб, который ранее никем не был описан. Во-вторых, требуется изучить целый ряд его характеристик и свойств, перечень которых установлен Международным комитетом по систематике бактерий, и найти отличия нового организма от ранее описанных. В третьих, «электронный паспорт» нового микроба, в роли которого выступает нуклеотидная последовательность гена 16S рРНК, следует отправить в Международный банк генетической информации (GenBank), а самого микроба депонировать не менее чем в двух международных коллекциях микроорганизмов, расположенных в различных странах. Коллекции отвечают за сохранность поступивших к ним культур и занимаются их коммерческим распространением. В России такую функцию выполняет Всероссийская коллекция микроорганизмов (ВКМ), чьи двери всегда гостеприимно распахнуты для новых представителей микробного мира. По окончании процедуры депонирования в коллекции автору описания нового микроорганизма выдается сертификат. Наличие двух таких сертификатов из разных коллекций и публикации статьи с описанием нового микроорганизма — это и есть необходимые условия для включения вашего микроба в перечень узаконенных имен, признанных мировым научным сообществом. С этого момента ваш питомец начинает жить самостоятельной научной жизнью. Он может быть затребован из коллекций другими лабораториями, которые будут использовать его в своих экспериментах,

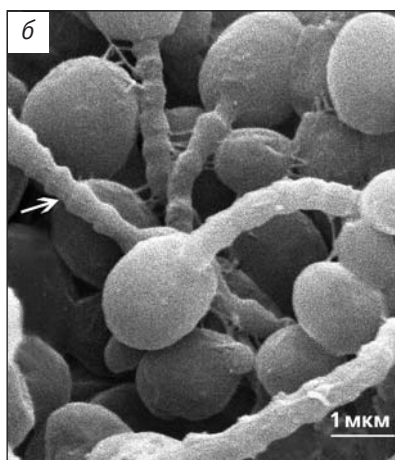
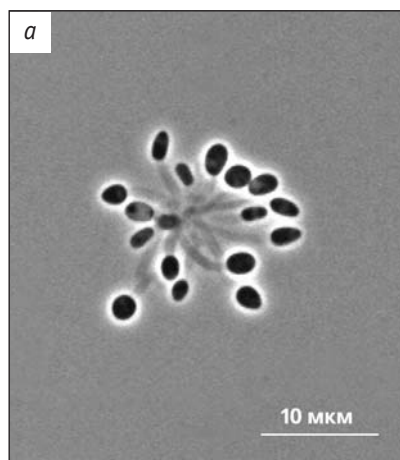


Рис.8. *Zavarzinella formosa* — один из немногих полученных в культурах планктомицетов, клетки которых обладают стебельками, соединяющими клетки в элегантные розетки. а — при наблюдении в фазовом контрастном микроскопе. б — сканирующая электронная микроскопия (фото О.И.Баулиной).

исследовать его метаболизм, изучать функции, ускользнувшие от вашего внимания.

Какие же функции выполняют планктомицеты в болотных экосистемах? Изучение свойств новых изолятов показало, что все они — аэробные микроорганизмы, но способны успешно развиваться и в микроаэробных условиях (т.е. в верхнем горизонте затопленной водой части болотного профиля). В ходе наших исследований выяснилось, что планктомицеты — один из основных компонентов целлюлозолитического бактериального сообщества кислых болот, а также сообществ, развивающихся в процессе разложения фитомассы сфагновых мхов. Для выявления роли планктомицетов в этих сообществах был проведен анализ способности изолятов из болот к деградации различных биополимеров, в том числе основного компонента фитомассы сфагнума — целлюлозы. Как оказалось, планктомицеты успешно разлагают ряд гетерополисахаридов растительного происхождения, таких как пектин, ксилан, ламинарин. Однако ни один из изученных нами болотных планктомицетов

не мог разлагать целлюлозу в чистой культуре.

Для выяснения причин высокой численности планктомицетов в целлюлозолитическом сообществе аспирантка нашей лаборатории А.И.Иванова поставила модельный опыт. В нем оценивалась возможность развития планктомицета на минеральной среде с целлюлозой в присутствии болотного стрептомицета-целлюлозолитика. После 14-дневной инкубации с целлюлозой численность клеток планктомицета в совместной культуре со стрептомицетом выросла почти на порядок, а в монокультуре осталась без изменения. Этот результат говорит о вторичной роли планктомицетов в целлюлозолитических сообществах, которая сводится к использованию соединений, образующихся в ходе разложения целлюлозы микроорганизмами-гидролитами. Значит, одна из главных функций планктомицетов в северных болотных экосистемах — участие в деструкции органического вещества. «Апатмох»-планктомицетов в болотах мы не обнаружили, что вполне логично, поскольку в ультрапресных сфагновых бо-

лотах отсутствует энергетический субстрат планктомицетов этой физиологической группы — аммоний.

«Так что же, — спросите вы, — похоже, все загадки болотных планктомицетов уже разгаданы?» Нет, до этого еще далеко. Значительная часть выявленных нами в торфе болот планктомицетов (согласно анализу 16S рРНК) существенно отличается от таковых у описанных *Schlesneria paludicola*, *Singulisphaera acidiphila* и *Zavarzinella formosa*. Каким организмам они принадлежат и какими свойствами обладают эти неизвестные пока планктомицеты — еще предстоит выяснить.

Итак, исследования последних лет позволили существенно расширить наши знания о разнообразии, метаболических типах и экологических функциях планктомицетов, одной из наиболее удивительных групп микроорганизмов. И все же по сравнению с другими, хорошо известными микробиологам, бактериями филогенетическая группа *Planctomycetes* продолжает оставаться очень слабоизученной и ждет новых пытливых исследователей ее тайн. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 06-04-49148.

Литература

1. Schmidt J.M., Starr M.P. // Current Microbiology. 1980. V.4. P.183—188.
2. Staley J.T. // Can. J. Microbiol. 1973. V.19. P.609—614.
3. Stackebrandt E., Ludwig W., Schubert W. et al. // Nature. 1984. V.307. P.735—737.
4. Woese C.R. // Microbiol. Rev. 1987. V.51. P.221—271.
5. Wagner M., Horn M. // Current Opinion in Biotechnology. 2006. V.17. P.241—249.
6. Fuerst J.A. // Annu. Rev. Microbiol. 2005. V.59. P.299—328.
7. Fuerst J.A., Webb R.J. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1991. V.88. P.8184—8188.
8. Strous M., Fuerst J.A., Kramer E.H. et al. // Nature. 1999. V.400. P.446—449.
9. Fuerst J.A. // Microbiology. 1995. V.141. P.1493—1506.
10. Neef A., Amann R., Schlesner H., Schleifer K.-H. // Microbiology-UK. 1998. V.144. P.3257—3266.
11. Dedysb S.N., Pankratov T.A., Belova S.E. et al. // ApPl. & Environ. Microbiol. 2006. V.72. P.2110—2117.
12. Куличевская И.С., Панкратов Т.А., Дедыш С.Н. // Микробиология. 2006. Т.75. №3. С.389—396.
13. Kulichevskaya I.S., Ivanova A.O., Belova S.E. et al. // Int. J. Systematic & Evolutionary Microbiol. 2007. V.57. P.2680—2687.
14. Kulichevskaya I.S., Ivanova A.O., Baulina O.I. et al. // Int. J. Systematic & Evolutionary Microbiol. 2008. V.58. P.1186—1193.
15. Kulichevskaya I.S., Baulina O.I., Bodelier P.L.E. et al. // Int. J. Systematic & Evolutionary Microbiol. 2009. V.59. P.357—364.
16. Заварзин Г.А. // Микробиология. 1961. Т.30. №5. С.952—975.

Внутриплитная эндогенная активность в океане — новые факты

Т.И.Лыгина

Приэкваториальная часть Северо-Восточной котловины Тихого океана, заключенная между трансформными разломами Кларион и Клиппертон, — один из наиболее изученных участков океанического ложа. Именно здесь располагается самая известная провинция абиссальных (глубоководных) железомарганцевых конкреционных руд, содержащих высокие концентрации марганца, никеля, меди и кобальта и представляющих практический интерес для будущих разработок.

История изучения этой части Мирового океана берет свое начало с первой кругосветной океанографической экспедиции парусно-парового корвета «Челленджер» (Великобритания) в 1872—1876 гг. В последние полвека здесь проводятся планомерные комплексные геолого-геофизические изыскания, направленные на изучение конкреций и условий их залегания. В исследованиях участвуют многие члены мирового сообщества, имеющие на площади провинции лицензионные участки, — как отдельные страны (Франция, Германия, Япония, Южная Корея, Китай), так и международные консорциумы (рис.1). Имеет свой лицензионный участок и Россия — так называемый Российский разведочный район



Татьяна Ивановна Лыгина, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Государственного научного центра ФГУП «Южморгеология» (г.Геленджик). Круг научных интересов охватывает проблемы океанского рудогенеза.

(РРР) площадью 75 тыс. км². Изучение конкреционных руд на площади РРР проводится на основании контракта на разведку, заключенного в 2001 г. Международным органом по морскому дну ООН (МОД ООН) и государственным предприятием «Южморгеология» — представителем Российской Федерации в МОД ООН с 1983 г.

Многолетние комплексные геолого-геофизические исследования на площади провинции Кларион-Клиппертон позволили детально изучить структуру глубоководных скоплений железомарганцевых конкреций и создать геологическую модель месторождения. Однако, несмотря на продолжительный срок изучения и интенсивные исследования последних десятилетий, основные вопросы, связанные с генезисом конкреций, по-прежнему остаются дискуссионными.

К ним относятся проблемы источника рудного вещества, механизм конкрециеобразования, скорости рудонакопления и возраст самих конкреций. В прояснении этих вопросов большую роль играет информация, полученная при изучении геологических условий локализации железомарганцевых конкреций.

Изучая геологию океанского дна и условия залегания абиссальных руд, морские геологи и геофизики совершают все новые и новые открытия. К этой категории относятся и проявления внутриплитной тектонической активности, не связанной с островодужными системами и зонами спрединга на срединно-океанических хребтах. Признаки такой активности обнаруживаются в провинции Кларион-Клиппертон начиная с конца 70-х годов прошлого века [1—4]. Недавно российскими геолога-

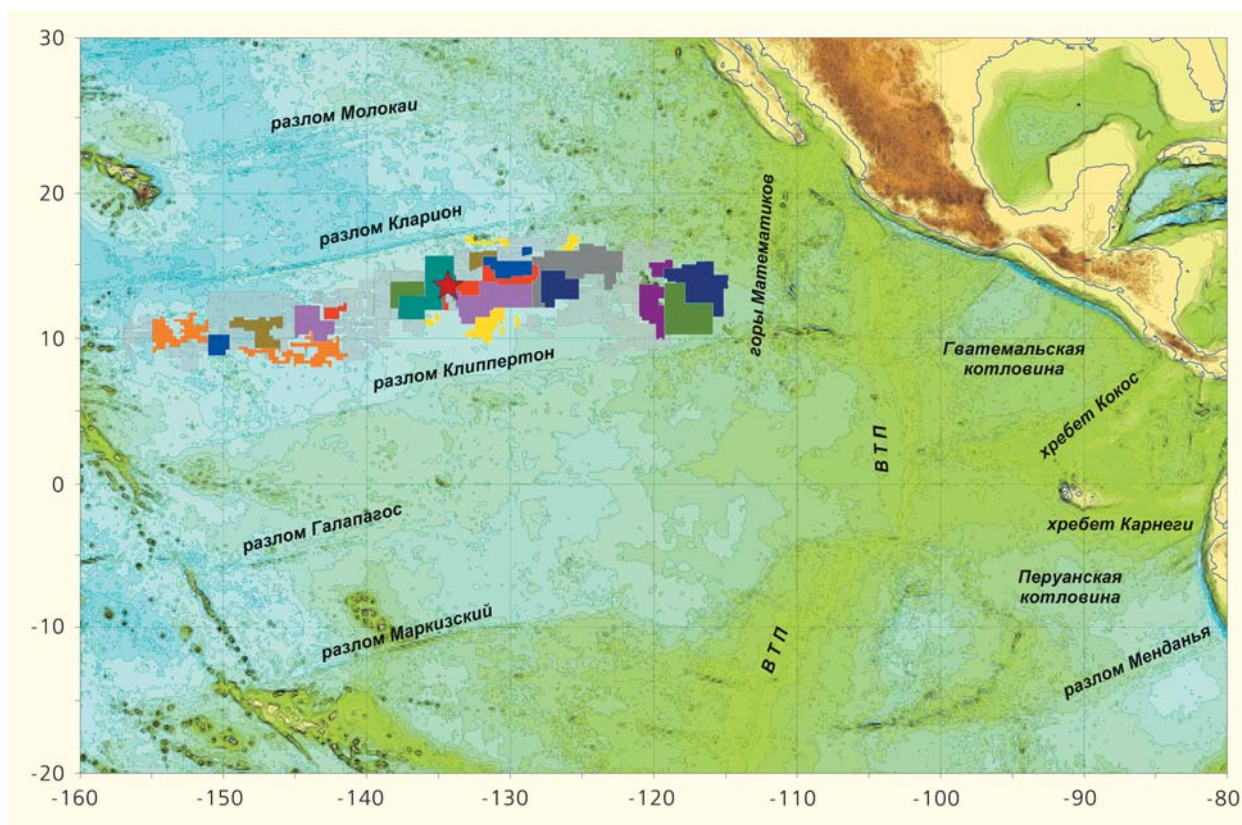


Рис.1. Лицензионные участки, выделенные для разведки полиметаллических руд в провинции Кларрион-Клиппертон (серым цветом показаны участки, зарезервированные за Международным органом по морскому дну при ООН). Звездочкой отмечено положение района работ экспедиции 2006—2007 гг.

ми получены новые свидетельства эндогенной активности в этом регионе.

В 2006—2007 гг. на одном из участков вершинной поверхности регионального поднятия Восточное (рис.2) геологи и геофизики «Южморгеологии» проводили поисково-разведочные и детальные работы по изучению конкреционного оруденения. Исследования включали батиметрическую съемку многолучевым эхолотом Simrad EM 12S-120, высокоразрешающее придонное геоакустическое профилирование и локацию бокового обзора глубоководным комплексом МАК-1М, непрерывное фототелепрофилирование комплексом «Нептун» и донное опробование коробчатым пробоборником и прямоточной гравитационной трубкой. Детальные исследования на площади 360 км² проходили в централь-

ной части полигона поисково-разведочных работ (площадью около 5 тыс. км²). Межпрофильное расстояние при детальных работах составляло 1 км и для геоакустики, и для фотопрофилирования, а при работах поисково-разведочной стадии — 3 км для фотопрофилирования и от 6 до 9 км — для геоакустики.

Были получены новые материалы не только о рудоносности участка, но и о его геологическом строении. Выяснилось, что локальный рельеф дна здесь сильно отличается от рельефа, типичного для провинции в целом.

На региональном уровне в пределах абиссальной равнины

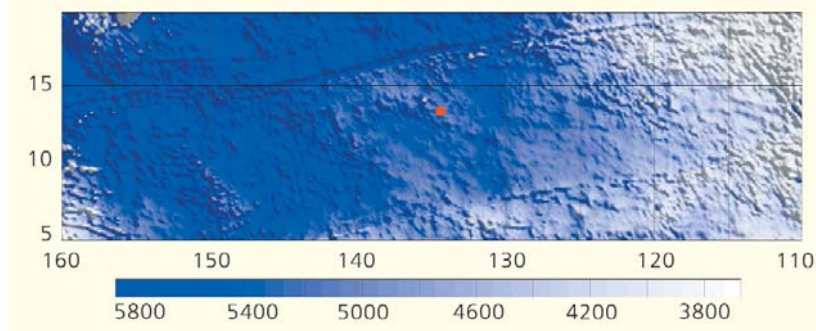


Рис.2. Карта рельефа дна провинции Кларрион-Клиппертон и положение участка исследований. Шкала глубин в метрах.

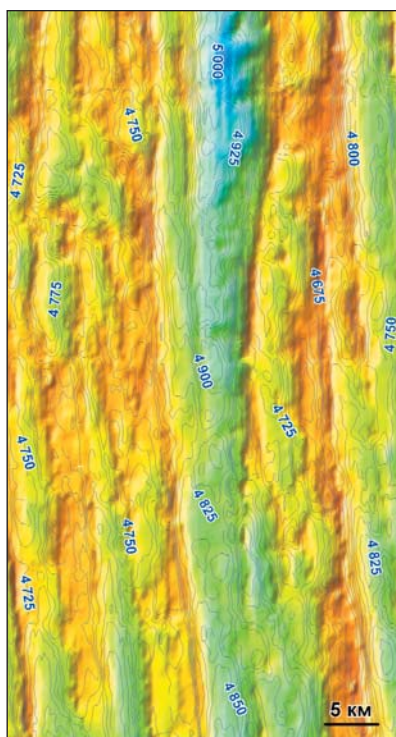


Рис.3. Типичный рельеф дна провинции Кларин-Клиппертон на локальном уровне (физиографическая карта по данным батиметрической съемки многолучевым эхолотом).

между трансформными разломами Кларин и Клиппертон выделяются крупные приподнятые и опущенные блоки шириной в сотни километров, имеющие в целом ортогональную по отношению к ограничивающим провинцию трансформным разломам ориентацию — от запад-северо-западной (поднятие Восточное) до север-северо-западной (поднятие Купера). На локальном уровне рельеф провинции также имеет клавишно-блоковое строение, характеризуется высокой степенью расчлененности. Он представляет собой чередование линейных положительных и отрицательных структур — вытянутых валообразных и грядообразных поднятий и долиноподобных впадин шириной от нескольких сотен метров до нескольких километров. Впадины разделены крутыми склонами высотой в десятки и сотни метров. Такие структуры простираются на десятки километров (на некоторых участках более чем на 100 км), сохраняя свою ориентацию (рис.3). Примечательно, что основное на-

правление локальных структур рельефа (в отличие от регионального уровня) — субмеридиональное (с небольшим отклонением в ту или иную сторону).

Участок работ, в отличие от основной площади провинции, представляет собой плоскую абиссальную равнину со средней глубиной 4800 м (рис.4). И вертикальная, и горизонтальная расчлененность рельефа дна здесь в целом очень низкая, хотя прослеживаются пологие широкие положительные и отрицательные структуры той же меридиональной ориентации, что характерна и для локального рельефа всей провинции. Наиболее яркая особенность рельефа — многочисленные положительные и отрицательные структуры изометричной формы. Они представляют собой, с одной стороны, вулканические постройки центрального типа, а с другой — весьма необычные депрессионные структуры воронкообразной формы.

Вулканические постройки

Обнаруженные вулканы представляют собой аппараты центрального типа с плоскими или куполообразными вершинами, иногда с кратерами (рис.5). Размеры основания одиночно стоящих крупных вулканов (по нижней замкнутой изобате) достигают 5 км, многовершинных вулканических массивов — 12 км. Относительная высота этих сооружений составляет несколько сотен метров (в отдельных случаях до 700—800 м). На крутых (30—45°) склонах обнажаются подушечные лавы, массивные базальты со столбчатой отдельностью и развалы. На относительно пологих площадках-ступенях отмечаются осадки со скоплениями мелких железомарганцевых конкреций. На коренных магматических породах развиты железомарганцевые корки.

Вулканы образуют цепочки, вытянутые в направлении доминирующей системы разрыв-

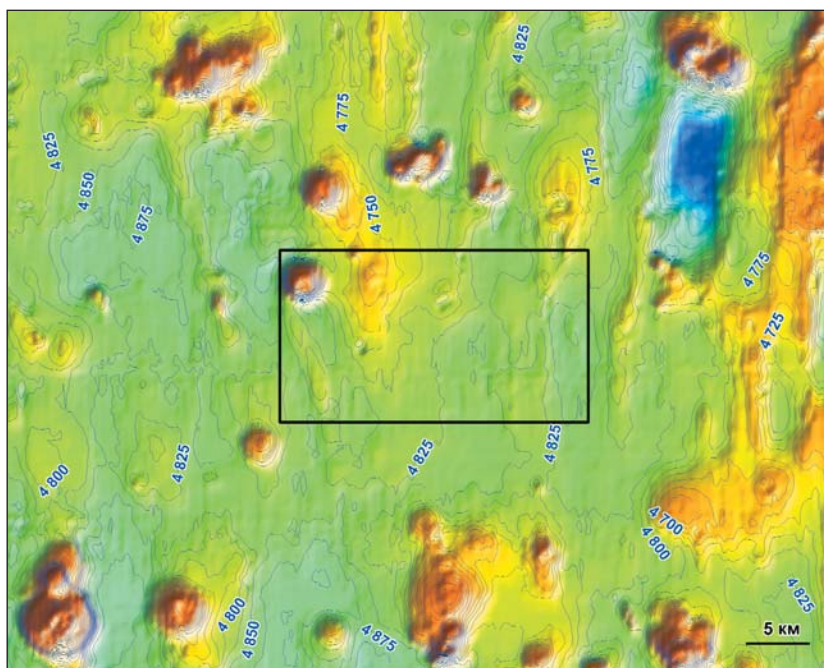


Рис.4. Рельеф участка вершинной поверхности Восточного регионального поднятия (физиографическая карта по данным батиметрической съемки многолучевым эхолотом). Прямоугольник — полигон детальных работ.

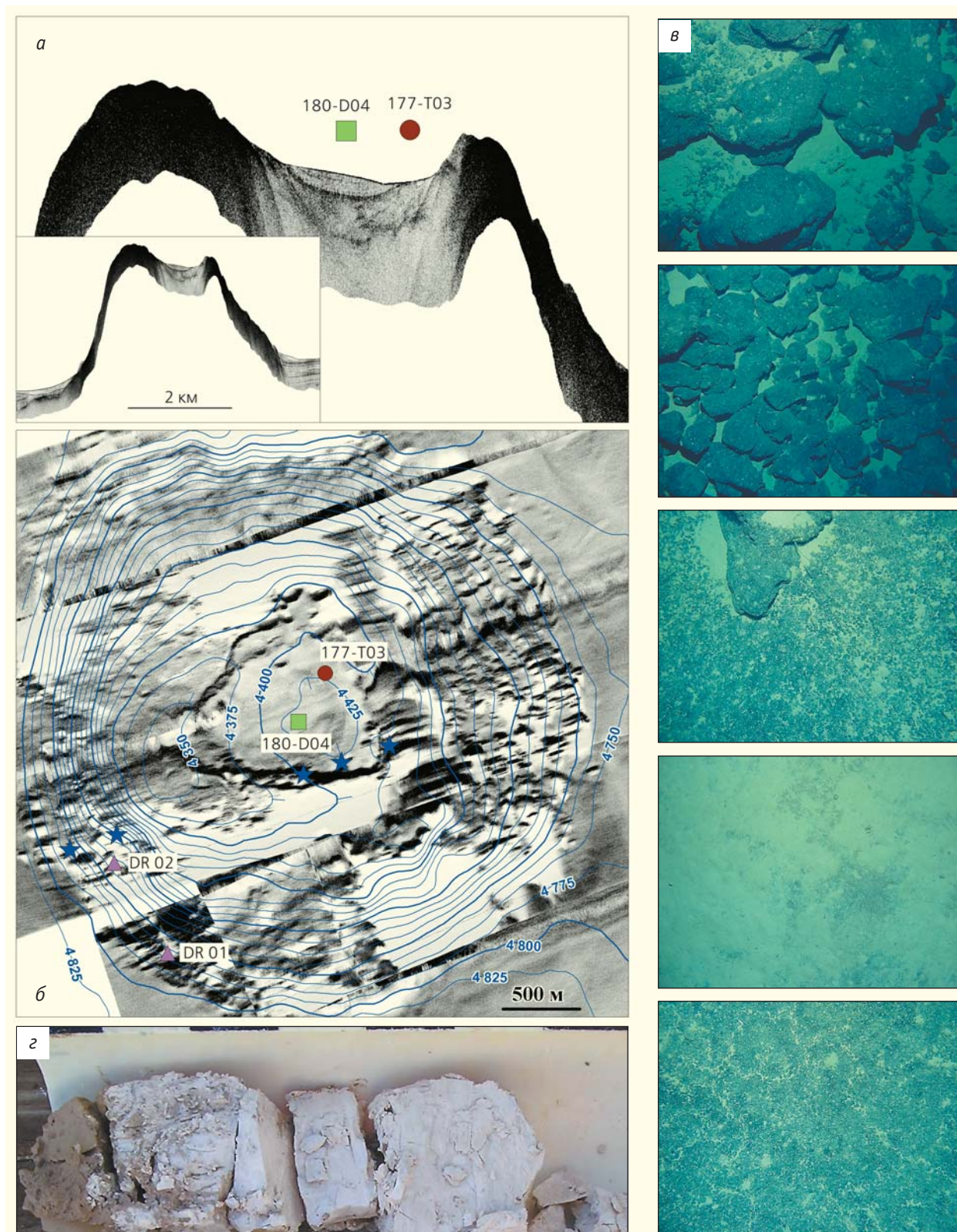


Рис.5. Вулканическая постройка высотой около 500 м на материалах придонного геоакустического профилирования. *а* — фрагменты профилограммы, *б* — монтаж сонограмм, *в* — примеры кадров фотопрофиля через вулканическую постройку, *г* — керн трубки 177-Т03. Цветными значками обозначены станции опробования, звездочками — положение фотокадров (слева направо — сверху вниз).

ных нарушений регионального уровня, которая параллельна трансформным разломам Кларин и Клиппертон. В то же время длинные оси массивов в вулканических цепочках вытянуты субмеридионально и параллельны структурам локального рельефа.

Воронкообразные депрессии

Изометричные или вытянутые депрессии глубиной от 10 до 100 м и размерами от 50 м до 1.5 км в поперечнике (рис.6) по форме напоминают перевернутый вниз вершиной более или менее правильный конус с крутыми (иногда более 45°) бортами. В пределах детального полигона и непосредственно у его северной границы закартировано по крайней мере 20 таких воронок (рис.7). Они, как правило, приурочены к приподнятым частям рельефа, однако встречаются и в днищах впадин. Мощность осадочной толщи на уча-

стках, окружающих воронки, достигает 100–150 м.

На склонах в уступах, а иногда и в днищах воронок обнажаются коренные породы — карбонаты и базальты, нередко перекрытые покровами современных глин, часто с конкрециями. Количество конкреций в некоторых воронках сопоставимо с их количеством на участках залежи, окружающей воронки (20–25% площади для крупных конкреций и 50–60% для мелких). У бортики воронок, за 100–200 м от обрыва, количество железомарганцевых конкреций на поверхности дна резко увеличивается (рис.6).

Линейные субвулканические тела

Воронки в провинции Кларин-Клиппертон были обнаружены отечественными и зарубежными исследователями еще в 80-х годах прошлого века [7, 8], однако до сих пор их происхождение остается дискусси-

онным, вызывая порой самые неожиданные гипотезы [9]. Надо сказать, что с самого начала по отрывочным материалам было замечено, что в сейсмической записи под дном воронок фиксируется усиление отраженного сигнала (характерное для базальтовых пород фундамента) или аномальный характер волновой картины. Теперь же на материалах обширных поисково-разведочных и детальных работ установлено, что и вулканические постройки, и воронки связаны с линейными магматическими (субвулканическими) телами. Такие тела впервые обнаружены на площади провинции (по крайней мере упоминаний о них в печати не встречалось) во время экспедиции Государственного научного центра «Южморгеология» в 2006–2007 гг. И это — еще одно принципиально новое открытие в геологии провинции.

Субвулканические тела шириной от нескольких сотен метров до нескольких километров протягиваются под поверхнос-

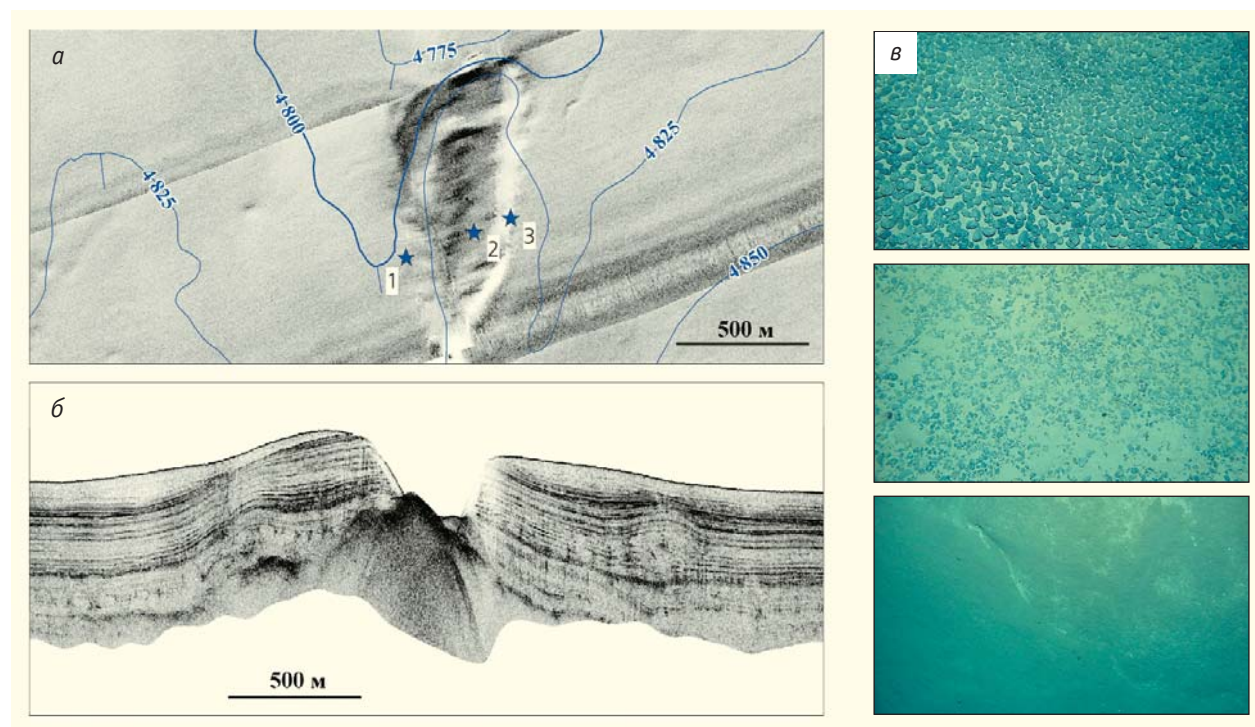


Рис.6. Воронка глубиной около 70 м на материалах придонного геоакустического профилирования. а — монтаж сонограмм; б — фрагмент профилограммы; в — кадры фотопрофиля через воронку.

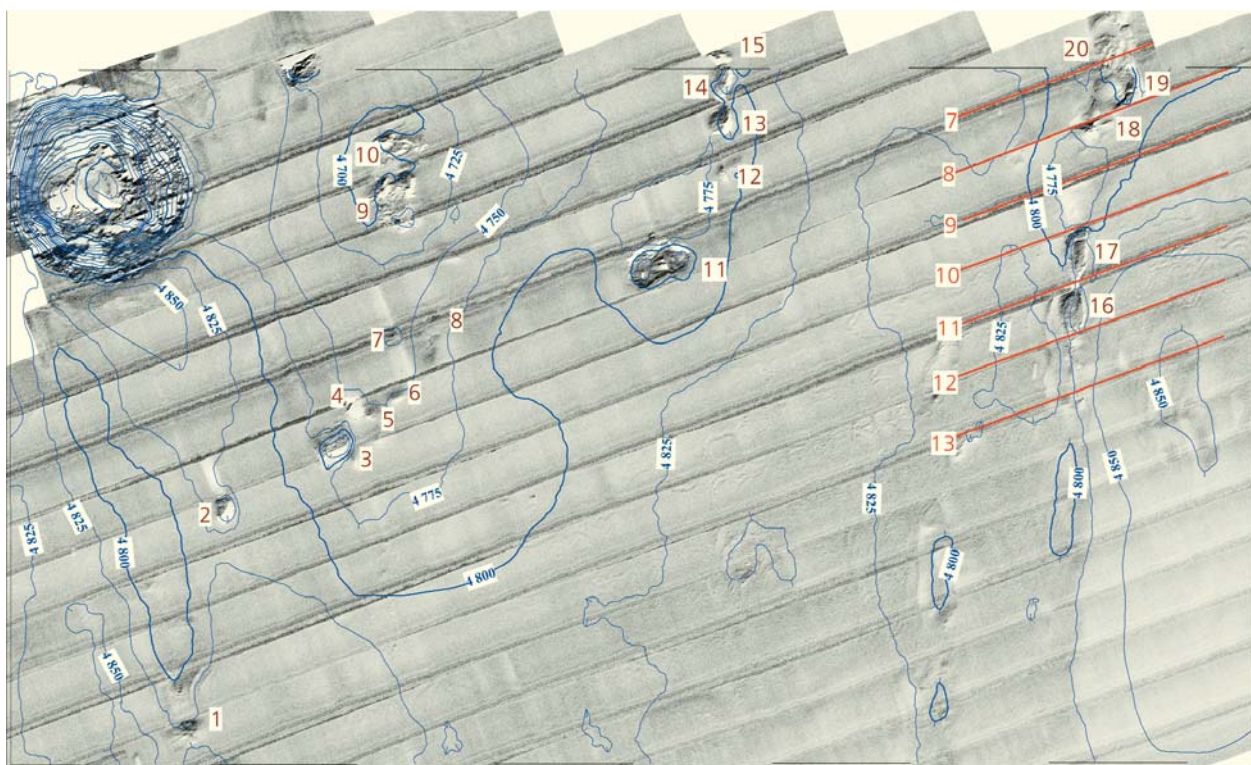


Рис.7. Расположение воронок и вулканических построек на площади детального полигона. Материалы придонной геоакустической съемки, монтаж сонограмм. Цифрами коричневого цвета обозначены номера воронок, красным цветом — отрезки и номера геоакустических профилей, приведенных на рис.9.

тью океанического дна в субмеридиональном направлении, т.е. в направлении, совпадающем с генеральной ориентацией локальных форм рельефа. Глубина их залегания меняется. Кровля одного и того же тела то погружается в осадок до 100–150 м и уходит за пределы максимальной глубины регистрации акустического профилографа, то воздымается вплоть до выхода на донную поверхность, где обычно увенчивается вулканическим сооружением (рис.8).

На рисунке приведена физиографическая карта участка дна, построенная по данным многолучевого эхолотирования, и фрагменты профилограмм, соответствующие выделенным отрезкам профилей придонной геоакустической съемки. По серии параллельных профилей (с 19-го по 29-й) кровля магматического тела прослеживается на глубинах 20–70 м от поверхности дна и в южном направле-

нии погружается глубже в осадочный чехол (профиль 31). Между профилями 24 и 27 структура выходит на поверхность дна в виде изометричной вулканической постройки размером около 3,5 км в поперечнике и высотой 150 м. На профилограмме 24 виден северный фланг постройки. Далее к северу, на продолжении структуры на профиле 11, тело снова выходит на поверхность дна, уже в виде крупного вулканического массива высотой около 700 м с основанием 7×12 км. Оно прослеживается с профиля на профиль на расстоянии более 50 км.

На участках, где тела не выходят на поверхность дна, над ними в осадочной толще повсеместно фиксируются складчатые и разрывные нарушения, угловые и стратиграфические несогласия, эрозия верхней части осадочного чехла. Нередко деформированные за счет внедрения тел и эродированные,

слои досреднемиоценового карбонатного комплекса несогласно перекрываются глинистыми отложениями, выражающимися на материалах геоакустической съемки в виде верхнего акустически прозрачного сейсмокомплекса. Его возраст относится к верхнему миоцену — кварталу. Эти особенности структуры разреза отчетливо видны на профилограммах, приведенных на рис.8. На геоакустических материалах в карбонатной части разреза над магматическими телами отмечаются участки аномальной записи волновой картины, которые могут трактоваться как зоны гидротермальной проработки осадков.

С линейными субвулканическими телами связаны и воронки, что четко проявляется на материалах геоакустического профилирования. Все воронки, обнаруженные на полигоне детальных исследований, расположены над апикальными частями

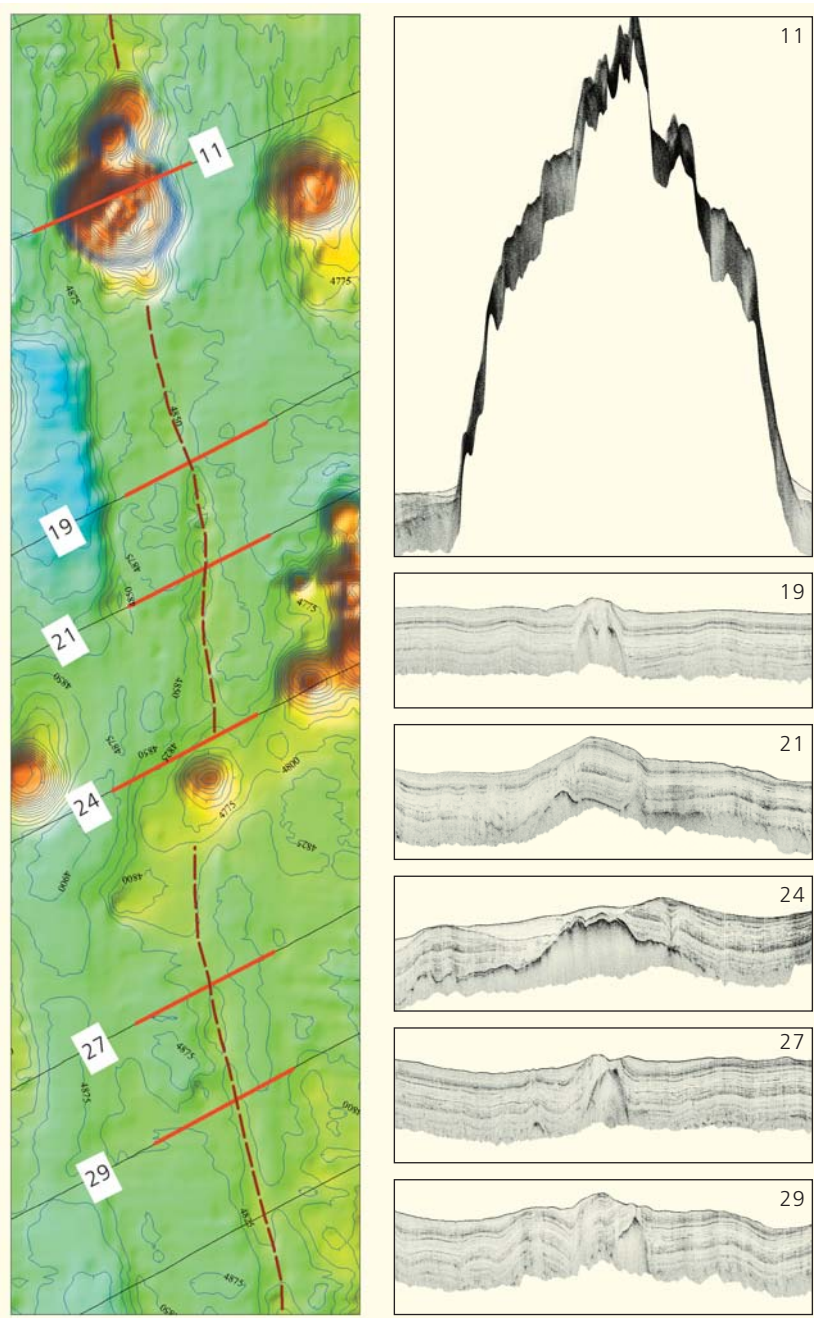


Рис.8. Выражение в рельефе линейного субвулканического тела (слева) и фрагменты профилограмм. Пунктирной линией показана линия простираения тела. Пояснение в тексте.

ми субвулканических тел. На рис.9 показано линейное субвулканическое тело, прослеживающееся с профиля на профиль в меридиональном направлении на расстоянии около 10 км, и связанная с ним цепочка воронок (с 16-го по 20-й номер на рис.7).

Возраст и состав построек

Мы попытались определить возраст пород, слагающих субвулканические тела, и сопоставить его с возрастом фундамента. К сожалению, получить пробы магматических пород из воронок не удалось, хотя, по дан-

ным фототелепрофилеированию и геоакустической съемки, в днищах некоторых воронок эти породы обнажаются. Более легкой задачей оказалось опробование магматических тел в местах, где они выходят на поверхность дна в виде вулканических построек.

После детального исследования традиционными минералого-петрографическими, химическими и тонкими микроаналитическими методами выяснилось, что образцы магматических пород, поднятые с четырех вулканических построек, однотипны и представлены оливин-плагиоклазовыми базальтами с повышенным содержанием щелочей (до 4.62% Na₂O и 1.30% K₂O). Отличаясь по составу от толеитовых базальтов коренного ложа, они принадлежат к типичным представителям внутриплитного вулканизма.

Для пяти образцов базальтов, поднятых со склонов двух вулканических сооружений, калий-аргоновым методом выполнено определение изотопного возраста (руководитель работ В.А.Лебедев, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН — ИГЕМ РАН). Абсолютный возраст пород составляет $35 \pm 2.0 - 39.5 \pm 2.5$ млн лет, что соответствует верхам позднего эоцена — раннему олигоцену. По материалам глубоководного бурения [5, 6], возраст коренного ложа в районе работ близок к 43–44 млн лет (средний эоцен). Таким образом, базальты, слагающие вулканические постройки, можно рассматривать как продукт более поздних, по сравнению с этапом формирования базальтового фундамента, излияний.

На вершинах вулканов часто отмечается мощная (до 70–80 м) осадочная толща, сложенная карбонатными породами, иногда перекрытая небольшим (до 5 см) слоем глины (рис.5). По материалам анализа фораминифер, карбонатные породы относятся к раннему-позднему

олигоцену — раннему миоцену (аналитики С.П.Плетнев, Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН; Л.Ф.Копеевич, геологический факультет МГУ им.М.В.Ломоносова). Определения возраста по радиоляриям (аналитик В.В.Шилов, Полярная морская геолого-разведочная экспедиция) дали тот же результат. Поверхностные глины, содержащие обильные фораминиферы, относятся к интервалу плиоцен—голоцен.

На базальтах, драгированных со склонов вулканических построек, обнаружены железомарганцевые корки мощностью до 10—12 см, имеющие двух- и трехслойное строение, и железомарганцевые конкреции с обломками базальтов в ядерной части. И корки, и конкреции характеризуются повышенным содержанием кобальта (до 0.43%). Возраст средней части одного из образцов железомарганцевой корки датирован по планктонным фораминиферам как позднемиоценовый (аналитик С.П.Плетнев).

Полученный комплексный материал свидетельствует, что вулканические постройки сформировались на границе эоцена—олигоцена. На их вершинах с раннего олигоцена отлагались карбонатные осадки. Далее в строении осадочной толщи отмечается перерыв — отложения среднего и верхнего миоцена в разрезе отсутствуют. Затем, начиная с плиоцена, практически чистый карбонатный материал сменяется более глинистым. Этот перерыв отразился и в рудообразовании, что зафиксировано в строении железомарганцевых корок, покрывающих базальты.

Гидротермальная активность

Были опробованы и отложения из периферических и днищевых частей восьми воронок. Наиболее интересной оказалась проба (станция 16, рис.10), ото-

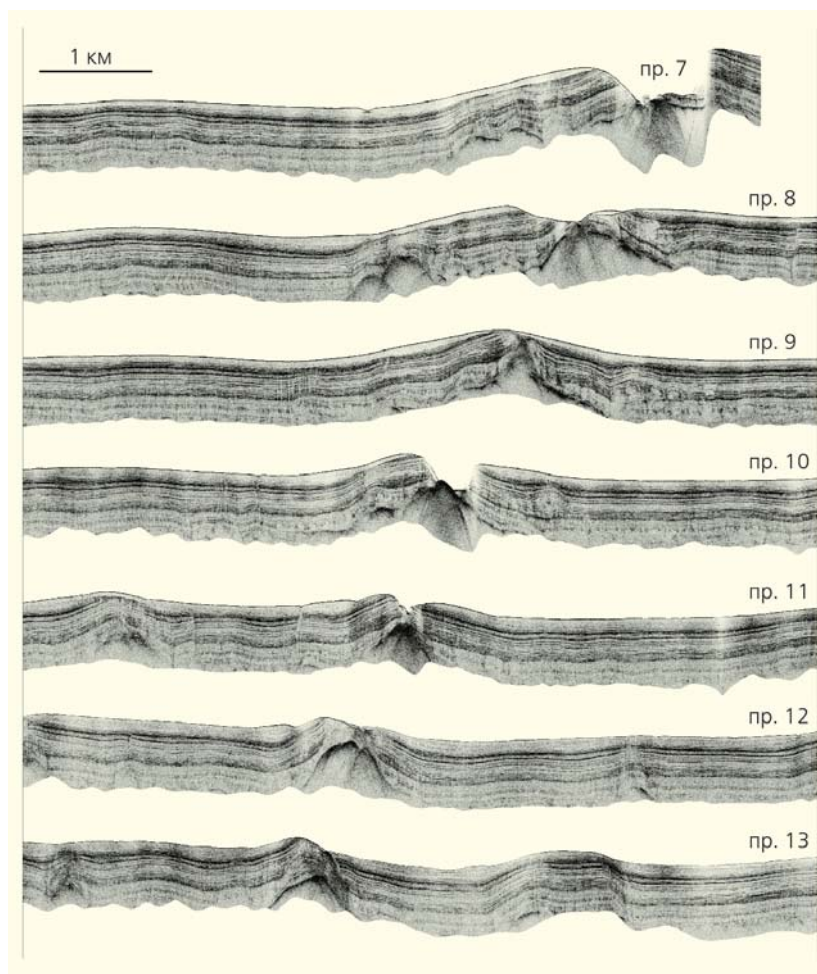


Рис.9. Линейное магматическое тело, прослеживающееся с профиля на профиль, и связанная с ним цепочка воронок. Материалы придонного геоакустического профилирования на детальном полигоне. Расстояние между профилями 1 км. Положение профилей см на рис.7.

бранная на перегибе между двумя соседними практически слившимися воронками (13 и 14 на рис.7). Она представляет собой штупф (15 см) глинистого известняка, перекрытого глинами, в котором выделяются четыре слоя. Верхний сложен обычной для центральной части провинции светло-коричневой комковатой текучей глиной, содержащей конкреции среднего размера (до 8 см по длинной оси). Ниже залегает глина зеленовато-желтого цвета, комковатая, мягкопластичная, совершенно нетипичная для осадочного разреза данного участка. Еще ниже — темно-серая, полутвердая, землистая, рыхлая глина, обильно

насыщенная тончайшей рудной пылью. Под глинами — глинистый известняк с содержанием CaCO_3 около 80%, серый за счет включений рудного материала вышележащего слоя.

Глины состоят из монтмориллонита, нонтронита и смешаннослойных монтмориллонит-гидрослюдистых минералов (ИКС-определения сделаны на геологическом факультете МГУ им.М.В.Ломоносова, РФА — во Всесоюзном институте минерального сырья — ВИМСе). В темно-сером осадке третьего слоя отмечается высокое содержание Mn (до 3.37%), хотя концентрация Fe при этом не превышает фоновых значений

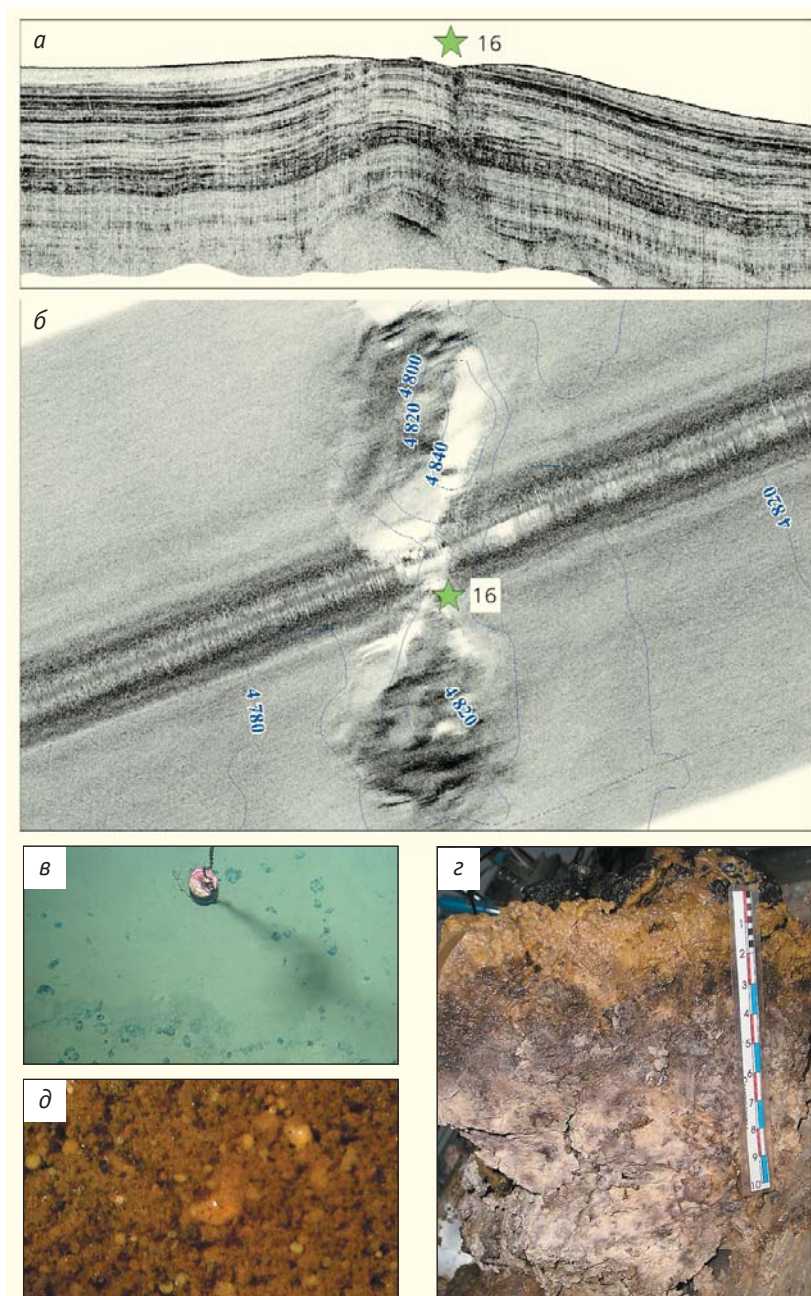


Рис.10. Характеристика станции 16. *а* — фрагмент профилограммы, *б* — сонограммы; *в* — донный снимок; *г* — донная проба; *д* — фотография промывки металлоносного осадка.

(3.7%). Кроме того, обнаружены повышенные содержания* меди

* Определение Cu, Ni, Co выполнены в Центральной аналитической лаборатории «Южморгеологии»; Sr — в спектральной лаборатории геологического факультета МГУ им.М.В.Ломоносова. Sr и Ba также определялись методом индукционно-связанной плазмы (ИСП-МС) в ВИМСе.

(1155 мкг/г), никеля (747 мкг/г), кобальта (337 мкг/г) и стронция (до 1500 мкг/г). В пробе отмечено высокое содержание бария (до 6600 мкг/г). Такой состав позволяет отнести этот осадок к металлоносным. В пробах, отобранных из других воронок, также уверенно диагностируются гидротермальные минералы. Та-

ким образом, характер осадочных отложений из разных воронок свидетельствует об их гидротермальном генезисе.

Возраст известняка из пробы со станции 16 на основании микрофаунистического анализа определен как поздний олигоцен — ранний миоцен. К тому же возрастному интервалу отнесены и карбонатные породы из других воронок. Возраст поверхностных глин, вмещающих конкреции, в одной из воронок определен как плиоценовый.

На предыдущих этапах изучения провинции Клариян-Клиппертон, в том числе на площади Российского разведочного района, неоднократно отмечались гидротермальные образования, в частности металлоносные осадки. Кроме того, в одной из дночерпательных проб, отобранных в экспедиции на научно-исследовательском судне «Академик Александр Сидоренко» в 1985—1986 гг. с глубины 5 тыс. м вблизи зоны одного из крупных разломов, среди уплотненных карбонатных глин был найден обломок густо-вкрапленной халькопиритовой (CuFeS_2) руды [3—4].

* * *

В рамках работ, проведенных в 2006—2007 гг. на региональном поднятии Восточное, сульфидов мы не нашли. Однако были получены новые убедительные свидетельства эндогенной, в том числе вулканической и гидротермальной, активности, проявившейся на рубеже позднего эоцена — раннего олигоцена и продолжавшейся на более поздних этапах. По нашим представлениям, субмеридионально ориентированные линейные субвулканические тела представляют собой внедрения трещинного типа. По-видимому, они маркируют места пересечения разрывных нарушений двух систем — разломов, связанных с системой трансформных разломов Клариян и Клиппертон, и субмеридиональных разрывов, обуслов-

ленных процессом неравномерного разрастания Восточно-Тихоокеанской плиты. Скорее всего, субмеридиональные разломы относятся к разряду долгоживущих и по ним происходили более поздние (по отношению к периоду формирования коренного ложа) внедрения магматических тел. Эти зоны оставались активными и во время накопления карбонатных осадков, и какое-то время после него.

Свидетельством тектонической активности региона в более позднем периоде развития служит и находка базальтовой гальки (2×3×4 см) в ядре одной из железомарганцевых конкреций на удалении 3—5 км от вулканических построек. Образец внешне ничем не выделялся из рядовой пробы железомарганцевых конкреций и был обнаружен только при ее дроблении. Порода определена как пироксен-плагиоклазовый базальт, отличающийся от описанных выше оливин-плагиоклазовых базальтов не только по составу и структурным характеристи-

кам, но и по возрасту. К-Ar-датированием установлен гораздо более молодой (по сравнению с базальтами вулканических построек) возраст — 15.8 ± 1.5 млн лет, что соответствует верхам раннего миоцена.

Этот факт, наряду со складчатостью в карбонатных породах нижнего структурного этажа и несогласным перекрытием их глинами среднего миоцена — квартера, свидетельствует, что на границе раннего и среднего миоцена (или в среднем миоцене) район снова испытал тектоническую активизацию, сопровождающуюся складчатостью и вулканическими излияниями. Только после этого в данной части провинции установился режим осадконакопления, подобный современному. Стали накапливаться глубоко-водные глинистые и кремнисто-глинистые отложения и формироваться железомарганцевые конкреционные руды. Гидротермальная активность, по всей видимости, к этому времени затухла. Об этом говорит, в частности, тот факт, что металлонос-

ный осадок и нонtronитовая глина, обнаруженные на станции 16, перекрыты слоем типичной для современного этапа осадконакопления слабокремнистой глины, содержащей довольно большое количество железомарганцевых конкреций.

Полученные данные, помимо сведений о геологическом строении региона, дают материал для оценки роли гидротермального источника в поступлении на дно рудного материала. В условиях спорадического, весьма ограниченного опробования осадочных и рудных образований, залегающих на вулканических постройках и в воронках, количественно оценить его вклад в рудообразование по сравнению с гидrogenным, диагенетическим и гальмиролитическим источниками пока трудно. Однако несомненно, что магматическая и постмагматическая деятельность в данном районе оказала существенное влияние на формирование состава конкреционно-коркового железомарганцевого оруденения. ■

Морские и лабораторные исследования выполнены в рамках государственных контрактов 17/01/101-23, 19/01/101-32 и 21/01/101-34.

Литература

1. *Bischoff J.L., Heath G.R., Leinen M.* // Marine Science. 1979. V.9. P.397—436.
2. *Bischoff J.L., Piper D.Z., Quintero P.* // Collog. Intern: La Genese des Nodules de Manganese. 1979. №289. P.119—137.
3. *Юбко В.М., Стоянов В.В., Горелик И.М.* // Советская геология. 1990. №12. С.72—80.
4. *Юбко В.М., Горелик И.М., Братанов А.А.* Металлоносные осадки и рудопроявления сульфидов зоны Клариян-Клиппертон // Геохимические исследования океанических железомарганцевых конкреций и вмещающих осадков. Геленджик, 1992. С.53—56.
5. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. V.16. Washington, 1973.
6. Paleogene Equatorial Transect of Leg 199. 23 October — 16 December 2001 in Proc. ODP. Preliminary Report (Ocean Drilling Program).
7. *Morel Y., Le Suave R.* // Bull. Soc. Geol. Fr. 1986. №3. P.361—372.
8. *Юбко В.М., Крамер К.Н.* Экзотический тип элементов геолого-геоморфологической структуры дна зоны Клариян-Клиппертон Тихого океана // Тезисы докл. 9-й Всесоюз. школы морской геологии. М., 1990. Т.2. С.106.
9. *Казанцев Р.А., Кругляков В.В.* // Бюл. МОИП. Отд. геологии. 1994. Т.69. Вып.4. С.83—85.

Горные реки равнин и горы с равнинными реками

В.М.Михайлов

Первая половина заголовка почти напрямую заимствована из монографии известного геолога, первооткрывателя колымского золота Ю.А.Билибина [1]. Парадоксальное определение «...равнина, орошаемая горными реками (скорее, дренируемая. — В.М.)» сформулировано на примере Алданского плоскогорья и с неменьшим основанием применимо к большинству подобных образований, в том числе почти ко всему Среднесибирскому плоскогорью. Бассейны рек Анабар и Оленёк на северо-востоке этой обширнейшей территории обладают аналогичными чертами (рис.1), несмотря на гораздо более низкое положение.

В то же время на планете встречаются сильно расчлененные островершинные горы, в которых большинство рек (за исключением верховьев и участков, где они прорезают осевые части хребтов) выработали извилистые русла в широкопойменных долинах и приобрели по существу равнинный характер. Это самые молодые участки суши, которые еще в кайнозой, максимум в позднем мезозое были глубоководными впадинами, накапливающими мелкозернистые осадки. Они распространены намного меньше и в нашей стране в чистом виде сосредоточены в основном на Сахалине (рис.2).

Контраст рассматриваемых территорий обобщен на рис.3.



Владимир Матвеевич Михайлов, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Северо-Восточной научно-исследовательской мерзлотной станции Института мерзлотоведения им.П.И.Мельникова СО РАН. Область научных интересов – талики речных долин, геологическая деятельность рек.

В первом случае наиболее выровненные участки приурочены к междуречьям; во втором это днища долин. Абсолютные отметки водоразделов в средней части бассейна р.Анабар редко достигают 200 м, урезы рек варьируют в диапазоне 10–50 м, причем подавляющая доля перепадов высот сосредоточена вблизи от тальвегов. На Сахалине глубина эрозионного вреза больше в 4–6 раз, и при этом крутизна склонов мало меняется от гребней водоразделов до тыловых швов пойм.

Причины таких диаметрально противоположных соотношений между элементами рельефа далеко не просты и требуют внимательного анализа.

Эрозионный цикл. Геологическая деятельность рек

У.М.Дэвис, «отец американской географии», известен главным образом как автор теории *географического цикла* [2]. В его работах обобщены сведения о том, что в развитии рельефа Земли прослеживается явная ритмичность. Эпохи горообразования (*орогенеза*), в результате которого на месте равнин или даже морского дна вырастают горные массивы высотой в километры (локально и в самые активные фазы — за какие-то сотни тысяч лет), сменяются длительными периодами тектонической стабильности, занимающими десятки миллионов лет и более. Это эпохи выравнивания (*планации*). На поздних этапах цикла от гор остается пологоволнистый рельеф «почти равнины», названной Дэвисом *пенепленом*. Ведущим фактором *денудации*, т.е. удаления продуктов разрушения (*выветривания*) скальных пород за пределы горных сооружений, в большинст-

ве случаев служит деятельность текучих вод, поэтому основная ипостась цикла географического — это *эрозионный цикл*. Сам «профессор Пеннелен» выделял в каждом цикле три основные стадии, дав им выразительные названия «молодость», «зрелость», «старость».

Концепция географического цикла неоднократно критиковалась, но все же понятия, введенные Дэвисом, в науке в основном прижились, хотя нередко в измененном толковании. «Возрастные» термины ныне применяются только к рекам [3], без однозначной привязки к стадиям эрозионного цикла. Из этих стадий — фаз — всеми (или почти всеми) исследователями признаются три: *глубинная эрозия (врезание)*, *динамическое равновесие* и *накопление аллювия (направленная аккумуляция)*. Первая соответствует «молодости» по Дэвису; вторая — «зрелости» и «старости»; последняя в изначальной схеме не выделялась. Между фазами врезания и равновесия некоторые авторы помещают стадию *боковой эрозии (расширения долины)*, другие присоединяют этот этап развития к одной из смежных фаз. При этом эрозионный цикл в целом давно утратил соразмерность с эпохами орогенеза и планации. Известно, что во многих растущих горных системах реки (точнее, отдельные их участки) могут находиться в любой из стадий. Поэтому «термин “эрозионный цикл” применяется обычно лишь к эрозионной деятельности, независимо от развития всего рельефа горной страны в целом» [1. С.145].

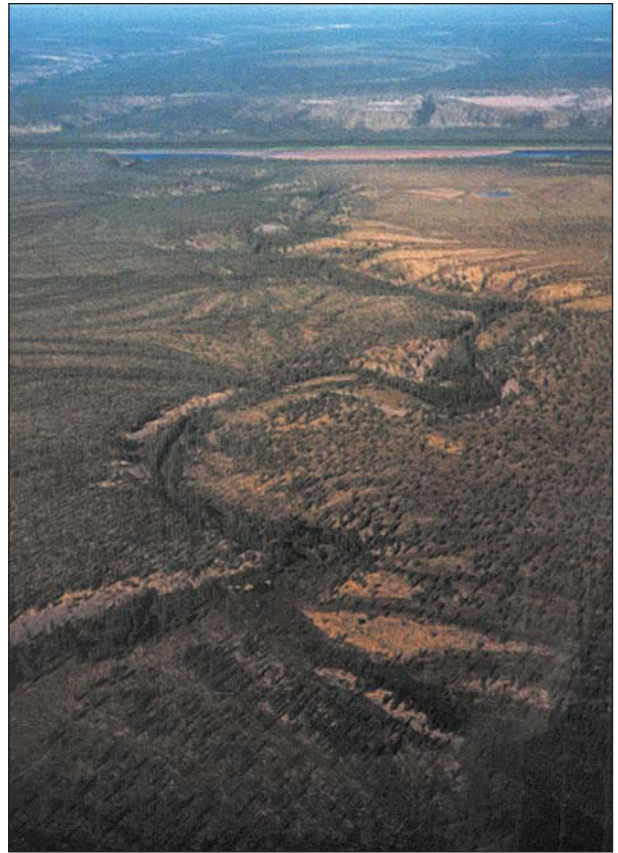


Рис.1. V-образная долина реки, впадающей в р.Анабар.



Рис 2. Широкопойменная долина IV порядка на о.Сахалин. Узкое извилистое русло ручья маркируется деревьями и кустарниками.

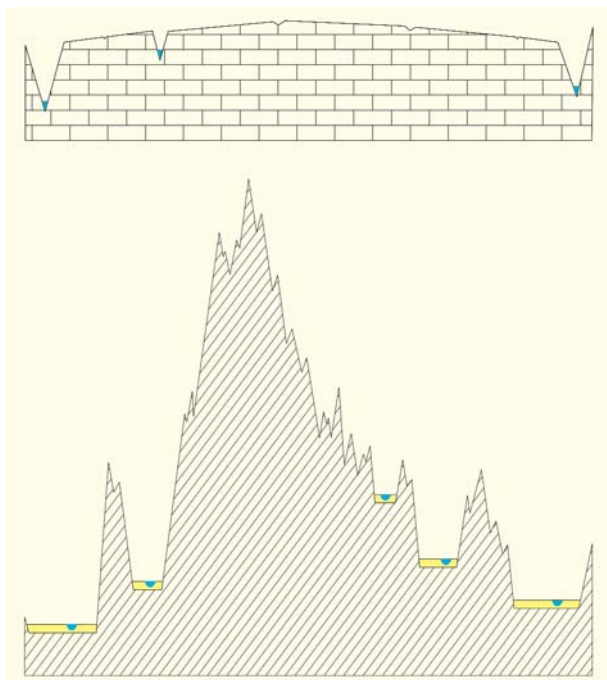


Рис.3. Схематические разрезы водоразделов, соответствующие рисункам 1 (вверху) и 2.

Для дальнейших построений достаточно первых двух общепризнанных стадий. Но оказывается, что даже здесь имеется широкий простор для разночтений. Универсальными можно считать лишь наиболее очевидные положения: основная причина глубинной эрозии — интенсивное воздымание гор; переход к расширению долины и далее к равновесию связан с замедлением либо прекращением этого процесса; продольный профиль долины при этом становится более пологим. Много копий сломано вокруг самого понятия «динамическое равновесие». История вопроса подробно рассмотрена в монографии магаданского геолога И.П.Карташова [4], он же предложил наиболее обоснованное с физической точки зрения объяснение причин перехода от глубинной эрозии к боковой.

В разрушении скальных пород водным потоком основная роль принадлежит двум механизмам: переносимые течением наносы как истирают коренное ложе, так и отламывают от него целые куски. Дело в том, что любая скала отнюдь не монолитна, она всегда пронизана более или менее густой сетью трещин различного генезиса и размера. При этом многие блоки оказываются частично или даже полностью оконтурированными системами трещин. Соударения *влекомых* наносов (передвигающихся путем скольжения, перекачивания и сальтации) с коренным ложем расшатывают эти в различной степени оформленные фрагменты на его поверхности, постепенно подготавливая их к окончательному отделению. Очевидно, что при

значительной трещиноватости пород (т.е. при небольших размерах фрагментов) эффективность второго механизма намного больше по сравнению с постепенным истиранием. Но оба они действуют лишь до тех пор, пока движущиеся наносы соприкасаются со скальным основанием ложа реки. По мере замедления восходящего развития рельефа ее продольный профиль выполаживается, скорость течения уменьшается, мощность донных наносов увеличивается, их нижние слои все реже приходят в движение и в конце концов остаются на месте даже в самые мощные паводки, прекращая тем самым глубинную эрозию.

В последних двух фразах и состоит вкратце суть концепции Карташова. Для ее подробного обоснования (равно как и в других построениях) автор использует понятие «баланс рыхлого материала»: это «соотношение между количествами рыхлого материала, выносимого рекой и поступающего в нее извне» [4. С.18] — здесь речь идет о продолжительных отрезках времени, намного перекрывающих все кратковременные климатические циклы. Этой своеобразной характеристике, по определению как бы количественной, явно не суждено выйти за рамки мысленных экспериментов. Она и ее аналоги часто применяются в теоретических построениях — так, еще в работах Дэвиса рассматривалось соотношение между поступлением рыхлого материала и *транспортирующей способностью* потока, т.е. тем его количеством, которое река в состоянии переносить. Эта характеристика потенциально более информативна, но в ней особенно наглядно проявляется общий недостаток валовых соотношений (т.е. оперирующих полными объемами рыхлого материала): в них нивелируются различия в характере взаимодействия водного потока с обломками различной крупности. Между тем эти различия носят принципиальный характер.

Транспорт *влекомых* наносов (в реках горных территорий это галька, гравий, небольшие валуны) представляет собой постоянные взаимопереходы процессов размыва, переноса и отложения, причем нередко все они развиваются одновременно в одном и том же поперечном сечении русла. При отсутствии дефицита обломков соответствующей крупности поток всегда перемещает ровно столько их, сколько способен (изменяя соотношение между аккумуляцией и размывом). Именно они составляют «костяк» ложа и намывной поймы реки, и поэтому некоторые авторы отождествляют их с *руслоформирующими наносами*; для рек, протекающих в горах, это обычно вполне справедливо.

Мелкие частицы, взвешенные в водной толще, могут намного превосходить по массе движущиеся по дну *влекомые* наносы, но и тогда их роль в составе отложений и в развитии рек второстепенна. Они преодолевают транзитом, без остановок, весьма протяженные участки и в чистом виде

откладываются на поверхности поймы в высокие паводки, образуя *пойменную фацию* аллювия. Естественные русловые потоки, включая самые мутные, способны переносить намного больше взвешенных наносов, чем реально в них присутствует (теоретический предел равен половине общего объема взвеси), т.е. реки практически безразличны к их количеству.

Наконец, в поток поступают и такие обломки, которые он не способен перемещать даже путем влечения (*перлювий*). Они время от времени передвигаются на небольшие расстояния под воздействием специфических процессов (например, вымывания аллювия из-под нижнего по течению края), но в целом по своей роли в потоке мало отличаются от выступов коренных пород. Последнее тем более справедливо в отношении крупных блоков, отделенных от коренного ложа реки субаквальным выветриванием: их подвижность ограничена соседними блоками, поэтому они остаются на месте до тех пор, пока не будут сточены движущимися обломками до размера влекомых наносов. Иными словами, если взвешенными наносами река всегда недогружена, то перлювием — даже тогда, когда он представлен одной единственной глыбой, — наоборот, перегружена. Его логично рассматривать как часть внешней по отношению к потоку среды, источник подвижных наносов.

Из всего сказанного следует, что направленность геологической деятельности реки определяется соотношением (в вековых масштабах времени) двух величин: интенсивности поступления обломков крупности руслоформирующих наносов и транспортирующей способности потока по отношению к этим наносам [5]. При этом необходимо учитывать все без исключения источники рыхлого материала: вышележащие участки реки, склоны долины, само русло и — что нередко упускается из виду — его скальное основание. Будем называть эту характеристику степенью насыщения потока руслоформирующими наносами. Ее преимущества можно оценить на примере равновесного участка реки (данная величина здесь равна единице, рыхлого материала выносится столько же, сколько поступает с вышележащих участков и склонов). Допустим, что в приходной части доля обломков крупности руслоформирующих наносов уменьшилась при равном увеличении количества мелкозернистого материала. С точки зрения валовых соотношений причин для нарушения равновесия нет, тогда как на самом деле оно не может не смениться врезанием: вынос влекомых наносов остается (поначалу) неизменным и никак не может быть восполнен усиленным осаждением взвешенных частиц — не говоря уже об отсутствии причин для подобной «компенсации». Наоборот, даже многократное увеличение или уменьшение поступления взвесей при неизменном полном насыщении потока руслоформирующими наносами может вызвать лишь очень

небольшое и постепенно сходящее на нет изменение мощности слоя пойменной фации аллювия.

Понятно, что в стадии глубинной эрозии поток недонасыщен руслоформирующими наносами — это и есть причина врезания. Несколько менее очевидно, что при боковой эрозии наступает перенасыщение: скальное ложе расширяющейся долины выстилается принесенным с вышележащих участков аллювием, который частично замещает разрушаемые коренные породы (недаром Билибин по существу объединял этот этап развития реки с фазой накопления аллювия, близкие взгляды высказывал и Дэвис).

Возвращаясь к рассматриваемому контрасту, его можно сформулировать следующим образом: в горах Сахалина реки преимущественно находятся в стадии динамического равновесия или даже накапливают аллювий, тогда как на современных плоскогорьях большинство водотоков очень далеко от этого состояния: им предстоит еще завершить глубинную эрозию и пройти стадию расширения долин. В чем же причина такого сильного отставания?

Ключевой фактор — характер разрушения скальных пород

Ответ на последний вопрос в первом приближении очевиден: различие заключается в эрозионной стойкости коренных пород и — шире — в сопротивляемости их выветриванию под влиянием других агентов природной среды. Обе характеристики тесно связаны и часто отождествляются с твердостью порообразующих минералов, но изложенные выше сведения о механизмах эрозии противоречат этому интуитивному убеждению.

Идея существования достаточно отчетливой грани в способности коренных пород распадаться на обломки того или иного размера давно носител в воздухе. Еще в начале 20-х годов прошлого века известный немецкий геоморфолог В.Пенк писал: «...склонность к образованию глыб есть специфическое свойство соответствующих пород» [6. С.114]. Противопоставления отдельных видов пород часто встречаются в отечественной литературе. В работе [7] склоновые отложения одного из регионов Сибири подразделены на курумо-глыбовники и щебеночники и отмечена приуроченность данных разновидностей к различным субстратам. На самом деле у большинства коренных пород в первичных продуктах выветривания преобладает либо щебень, либо намного более массивные обломки [5]. По этому признаку породы отнесены к щебнистому и глыбовому типам (последний, вообще говоря, правильнее называть глыбово-каменным). Здесь уместно привести градации крупности обломочного материала по Л.Б.Рухину [8]:

Размер*, мм	0,05–2	2–10	10–200	200–1000	>1000
Угловатые	песок	дресва	щебень	камни	глыбы
Окатанные	—	гравий	галька	валуны	—

* Размер обломка принято считать равным наименьшему диаметру отверстия, в которое он может пройти.

Такое подразделение особенно полезно для исследований геологической деятельности рек горных стран, ибо для них поступающий в русло щебень представляет собой «готовые» руслоформирующие наносы, которые сразу же включаются в триединый процесс: перенос—отложение—размыв. Роль намного более подвижной и быстро измельчающейся дресвы (а равно и гравия) в речных отложениях весьма незначительна [9], а из каменно-валунной фракции в состав влекомых наносов входят — и то в самых быстрых реках — только обломки наименьшего размера, примерно до 300 мм [5]. Ниже приведена краткая характеристика наиболее распространенных видов коренных пород.

Интрузивные породы (граниты, гранитоиды и т.д.) почти без исключений относятся к глыбовому типу. Они образуются из магмы, внедрившейся под большим давлением в толщу земной коры, но не нашедшей выхода на поверхность. Ее кристаллизация и остывание даже при сравнительно небольших объемах растягиваются на многие тысячи лет, и монолитность новообразованного скального массива нарушается лишь разреженными контракционными трещинами. Соответственно, первичные продукты выветривания таких пород представлены преимущественно глыбами. При субаэральном выветривании они со временем рассыпаются в дресву и песок, в основном минуя фракцию щебня (рис.4), а в сфере действия потока чаще постепенно истираются до размера руслоформирующих наносов.

Образованию осадочных пород (в силу присущей им слоистости и различных механических свойств осадков, слагающих соседние слои) сопутствует массовое возникновение трещин уже в ходе литогенеза; их густота еще более возрастает при последующих деформациях. Поэтому в большинстве эти породы относятся к щебнистому типу. К глыбовому типу принадлежат лишь некоторые разновидности песчаников (с наиболее толстыми слоями) и твердые карбонатные породы, в которых образовавшиеся были мелкие трещины легко залечиваются из-за высокой способности к перекристаллизации составляющих минералов. Как отмечал Билибин, «...известняки являются довольно мягкими и сравнительно легко истираются, но зато вследствие своей однородности и некоторой пластичности они неохотно образуют трещины, и потому выкрашивание их в процессе углубления русла играет лишь весьма второстепенную роль» [1. С.238].

Характер выветривания вулканогенных пород определяется рядом факторов; ведущий — это состав исходной магмы. При малом содержании кремниевой кислоты она обладает низкой вязкостью и изливается на земную поверхность сразу большими массами, растекаясь на значительные расстояния. Кроме того, базальтовая лава самая горячая; вероятно, это служит причиной прочного спекания свежих лавовых потоков с ранее застывшими слоями — иначе трудно объяснить формирование характерных столбчатых отдельностей. Живописные картины дезинтеграции базальтов, принимающей мегалитический облик («мостовая гигантов») помещены во многих популярных изданиях. Вязкая кислая лава извергается небольшими порциями, зачастую в виде пирокластического материала. Массовые излияния, при которых образуются крупноплитчатые отдельности, сравнительно редки; соответственно, большинство риолитов распадается почти исключительно на щебень (рис.5). Вулканы среднего состава на ранних стадиях дают в основном обломки крупности камней, но в дальнейшем также довольно быстро выветриваются до щебня.

У метаморфических пород характер трещиноватости в начальных фазах преобразования изменяется мало. Но на глубоких стадиях, когда под воздействием высоких температур и давлений происходит перекристаллизация образующих породу минералов, многие мелкие трещины зале-



Рис.4. Ход выветривания гранитоидов: скальные останцы распадаются на глыбы и камни, рассыпающиеся далее в дресву и песок.

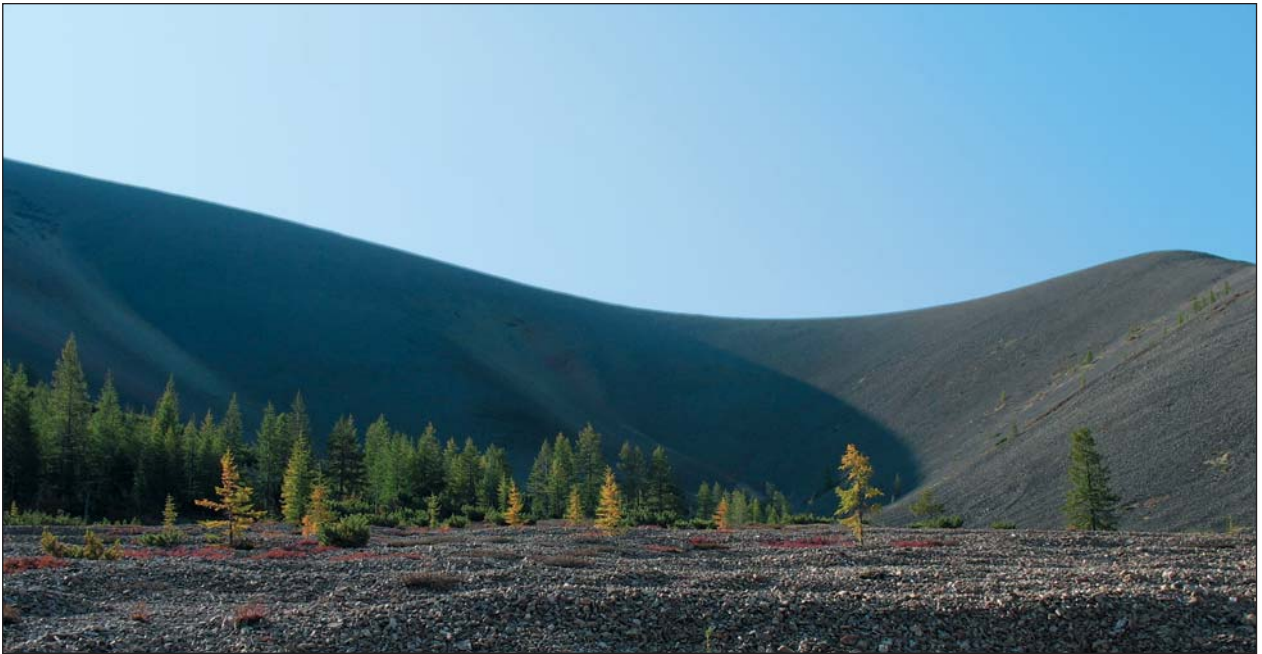


Рис.5. Горы, сложенные риолитами, нередко покрыты сплошным плащом щебня с небольшой примесью более мелких частиц.

чиваются. Поэтому ультраметаморфические и близкие к ним породы разрушаются преимущественно по глыбовому типу. Типичные примеры — кварциты и мраморы.

Самые крайние крайности

Причина предельно контрастных различий рассматриваемых территорий заключается в конечном счете в подавляющем преобладании тех или иных коренных пород. На северо-востоке Среднесибирского плоскогорья это доломитизированные известняки, принадлежащие к глыбовому типу. Снимок на рис.1 характеризует начальные этапы глубинной эрозии и может создавать впечатление, что процесс развивается весьма интенсивно. На самом деле он «протекает настолько медленно, что за это время даже окружающие крепкие породы успевают подвергнуться выветриванию, рассыпаться на глыбы, которые процессами денудации перемещаются вниз, в русло реки, еще более затрудняя ее врезание» [1. С.118]. Поэтому на заключительных этапах, когда у реки появляется зачаточная намывная пойма, она по большей части граничит уже со сравнительно пологими склонами (рис.6). К характеристике, данной Билибиным, остается лишь добавить, что мелкие обломки составляют сравнимую, или, скорее, большую, долю поступающего в русло рыхлого материала (рис.4). Они быстро перемещаются вниз по течению, мало способствуя измельчению перлювия и углублению коренного ложа. В совокупности все эти особенности поддерживают де-

фицит руслоформирующих наносов до тех пор, пока постепенно понижающаяся транспортирующая способность потока (из-за уменьшения его продольного уклона) не сравняется с также убывающей интенсивностью их поступления.



Рис.6. Глубинная эрозия близится к завершению (р.Эбелях, крупный приток Анабара).



Рис.7. Водоток III порядка (на переднем плане) в стадии боковой эрозии.

Переход к боковой эрозии сопровождается дальнейшим выполаживанием склонов (рис.7). На них часто формируется квазиортогональная сетка *деллей* (безрусловых, почти не выраженных в рельефе, ложбин стока) и пологих уступов, образованных *солифлюкцией* — медленным сползанием по мерзлomu водоупору переувлажненных тонкодисперсных грунтов, в толще которых взвешены более крупные обломки. Эта стадия здесь еще более растянута во времени: образовавшиеся ранее из глыбово-каменного материала дресва и крупный песок успевают, в свою очередь, выветриться до пыли и глин. В результате еще до окончательного наступления динамического равновесия прямые склоны долины сменяются вогнутыми, что отражает замедление их дальнейшей трансформации (рис.8).

Горы Сахалина сложены в основном палеоген-неогеновыми алевролитами, очень молодыми и слабо литифицированными осадочными породами. Они легко распадаются не только на щебень, но и на более мелкие обломки (рис.9) и поэтому стоят особняком, далеко уступая по устойчивости к выветриванию даже породам щебнистого типа. В водных потоках эти обломки продолжают интенсивно измельчаться (наименее плотные попросту размокают, а некоторые из более прочных, окатанных до галек, можно разламывать

пальцами), давая большие количества взвешенных частиц, которые тут же удаляются за пределы горных сооружений. Отсюда колоссальные различия в скоростях глубинной и боковой эрозии по сравнению с породами глыбового типа, выражающиеся, вероятно, не просто порядками, а многими порядками величин. При этом глубина современного эрозионного вреза никак не соответствует суммарному денудационному срезу интенсивно воздымающихся гор, которые при большей стойкости пород могли бы конкурировать с высочайшими хребтами. Их податливость подчеркивается сильнейшим расчленением водоразделов (рис.2, 3), напоминающих растянутый по вертикали овражно-балочный рельеф деградирующих пахотных земель.

Возвращаясь к плоскогорьям, или, точнее, к равнинам, прорезанным горными реками, стоит подчеркнуть, что это — пенелены отнюдь не современные (как можно понять из некоторых региональных физико-географических описаний), а *бывшие*, приподнятые неотектоническими движениями и вовлеченные в новый эрозионный цикл. При этом на окраине Среднесибирского плоскогорья реки, проходящие начальные этапы врезания (рис.1), от стадии динамического равновесия отделяет дистанция максимум в несколько десятков метров (имея в виду отметки тальвегов); на заключительных этапах (рис.6)



Рис.8. Стадия расширения долины почти закончилась, хотя речное русло местами еще подмывает коренные склоны (правая часть снимка).

она измеряется уже метрами. Но из-за очень низкой интенсивности глубинной и боковой эрозии для преодоления этой дистанции требуются геологически значимые промежутки времени. Кроме того, достижение равновесия речной сетью вовсе не означает, что рельеф в целом также близок к климаксовой стадии развития: для этого необходима прежде всего полная денудационная переработка междуречий, которая продолжается все более угасающими темпами. Иными словами, между окончанием эрозионного цикла (в его современном понимании) и даже неполным завершением цикла географического лежит еще очень и очень большая временная дистанция. (Логически этот цикл замыкается дальнейшим преобразованием пенеплена в эрозионную равнину — «совсем равнину». Но сам создатель теории высказывался на эту тему подчеркнуто скупко. Дело в том, что вероятность формирования таких равнин исчезающе мала, не говоря уже о сохранении их остатков на современном этапе преобладания восходящих движений земной коры. Собственно, по этой причине и был «придуман» пенеплен, в реальности которого усомниться намного сложнее.) Восстановление пенеплена в масштабах хотя бы окраин Среднесибирского плоскогорья даже при абсолютном тектоническом покое потребует, по-видимому, геологических эпох. При тех же условиях гораздо быстрее пенеплен сформируется на месте молодых, ныне все еще растущих гор, сложенных породами щебнистого типа, либо еще менее стойкими, т.е. «наилучшие» перспективы в этом отношении у резко расчлененных гор Сахалина. Другое дело, что вряд ли этим участкам земной поверхности будут предоставлены равные условия.

И в заключение — замечание, побуждающее к дальнейшим размышлениям. Коренные породы, слагающие горы Сахалина и Среднесибирское



Рис.9. Стенка «свежей» траншеи, пройденной экскаватором в палеогеновых алевролитах.

плоскогорье, — антиподы по части сопротивляемости как выветриванию вообще, так и эрозионному разрушению в частности. Тем не менее результат эволюции водотоков в обоих случаях одинаков: они вырабатывают меандрирующие русла (см. рис.2, 8). Крайности, следуя известной максиме, сходятся. Получается, что на долю рек, разветвленных на рукава, остается «золотая середина». Обоснование такого предположения требует самостоятельного анализа. ■

Литература

1. Билибин Ю.А. Основы геологии россыпей. М., 1955.
2. Дэвис В.М. Геоморфологические очерки. М., 1962.
3. Тимофеев Д.А. Терминология флювиальной геоморфологии. М., 1981.
4. Карташов И.П. Основные закономерности геологической деятельности рек горных стран (на примере Северо-Востока СССР). М., 1972.
5. Михайлов В.М. // Колыма. 2001. №2. С.22—27.
6. Пенк В. Морфологический анализ. М., 1961.
7. Воробьев И.В., Горшков С.П. // Вестник МГУ. Геология. 1975. №5. С.51—59.
8. Рухин Л.Б. Основы литологии. Л., 1969.
9. Добровольская Н.Г., Лодина Р.В., Чалов Р.С. // Геоморфология. 1991. №1. С.59—64.

Лазерная одиссея Теодора Меймана

М.Н.Сапожников,
доктор физико-математических наук
Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН
Москва

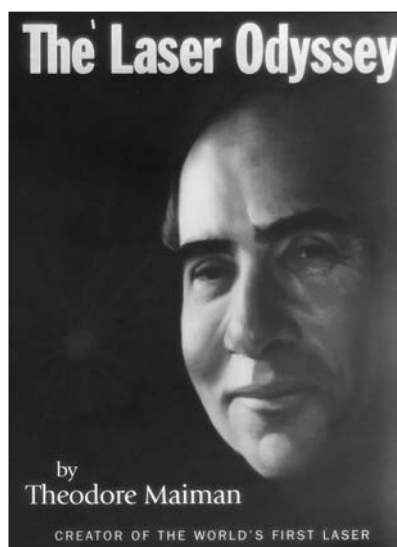
Пятьдесят лет назад на вершине горы на берегу Тихого океана, в Калифорнии, произошло чудесное событие. Человек впервые создал когерентный свет. 16 мая 1960 г. Теодор Мейман, сотрудник Исследовательской лаборатории Хьюза в Малибу, создал первый в мире лазер. Он получил генерацию красного когерентного излучения на бесфононной R_1 -линии на длине волны 6943 \AA в кристалле розового рубина.

Мейман написал книгу «Лазерная одиссея» (Maiman T.H. *The Laser Odyssey*. Blaine, 2000), в которой откровенно и увлекательно рассказал драматическую историю создания лазера. Тогда шла напряженная гонка с участием многих университетов и лабораторий США, стремившихся первыми получить генерацию когерентного света, после того как в 1954 г. был создан мазер.

2010 г. объявлен Международным годом лазера, и сейчас перевод книги Меймана готовится к публикации в России. Журнал «Природа» предлагает вниманию читателя фрагменты этой книги. Вкратце перечислим факты, оставшиеся за их пределами.

Теодор Мейман родился 11 июля 1927 г. в Лос-Анджелесе. В 1949 г. он закончил Колорадский университет и затем поступил в аспирантуру Стэнфордского университета, где под руководством лауреата Нобелевской премии Уиллиса Лэмба выполнил экспериментальное исследование лэмбовского сдвига в атомах гелия и защитил в 1955 г. докторскую диссертацию.

После этого, к большому огорчению Лэмба, который предлагал ему продолжить исследования, Мейман в 1956 г. перешел на работу в исследова-



Обложка американского издания книги «Лазерная одиссея». 2000 г.

тельную лабораторию Авиационной компании Хьюза в Калифорнии. Здесь ему поручили усовершенствовать рубиновый мазер. Закончив с большим успехом летом 1959 г. проект с рубиновым мазером, Мейман решил заняться проблемой создания лазера, которая стала актуальной после того, как был впервые сделан мазер.

Первым устройством, основанном на использовании стимулированного излучения, был микроволновый молекулярный генератор/усилитель (мазер) на пучке молекул аммиака. В 1954 г. его конструкция была разработана детально Николаем Геннадиевичем Басовым и Александром Михайловичем Прохоровым в Физическом Институте им.П.Н.Лебедева АН СССР и независимо группой

Чарльза Таунса в Колумбийском Университете в США. (В 1964 г. Басов, Прохоров и Таунс получили Нобелевскую премию по физике «за фундаментальную работу в области квантовой электроники, которая привела к созданию генераторов и усилителей, основанных на мазерно-лазерном принципе».)

В 1958 г. Шавлов и Таунс опубликовали статью в журнале *Physical Review*, в которой изложили принцип работы мазеров, рассмотрели возможность получения когерентного излучения в инфракрасной и оптической областях спектра и предложили попытаться создать лазер на парах калия. Их статья вызвала очень большой резонанс и стимулировала интенсивные исследования во многих университетах и лабораториях США.

Мейман проанализировал свойства различных систем, в которых можно было попытаться получить генерацию когерентного света, и остановил свой выбор на кристалле розового рубина. Однако администрация Лаборатории Хьюза

весьма скептически относилась к этой его работе, потому что та была «не по профилю» лаборатории и потому что Шавлов авторитетно утверждал во время Первой международной конференции по квантовой электронике в Нью-Йорке в сентябре 1959 г. и позже, что кристалл розового рубина не годится для этой цели.

Мейман сконструировал изящное, компактное устройство, поместив небольшой цилиндрический стержень из розового рубина с отполированными параллельными зеркальными торцами внутри спирали стандартной лампы-вспышки, которая находилась внутри цилиндрического кожуха с полированной зеркальной внутренней поверхностью. И в первом же эксперименте с этой системой он получил 16 мая 1960 г. стимулированное оптическое излучение в рубине.

Через месяц после этого, 22 июня 1960 г., Мейман направил краткое сообщение о своем достижении в журнал *Physical Review Letters* и через два дня получил от его редактора письмо с отказом опубликовать статью на том основании, что журнал уже больше не интересуется работами, посвященными лазерам.

Это стало началом загадочной, детективной истории в «лазерной одиссее» Меймана. Получив отказ из *Physical Review Letters*, он направил краткую версию статьи в престижный британский журнал *Nature*. В результате первое научное сообщение о создании лазера появилось 6 августа 1960 г. не в США, а в Великобритании. Статья называлась «Стимулированное оптическое излучение в рубине» (*Nature*, 1960. V.187. P.493).

Пока Мейман занимался проблемой публикации своей статьи, возникли слухи, что в некоторых лабораториях в США тоже уже созданы лазеры или дело близко к этому. Это обеспокоило администрацию Лаборатории Хьюза, которая не собиралась терять приоритет и, несмотря на возражения Меймана, решила срочно устроить пресс-конференцию.

Специальное рекламное агентство организовало 7 июля 1960 г. пресс-конференцию в отеле «Дельмонико» в Нью-Йорке. На ней присутствовали журналисты из газеты *New York Times*, журналов *Time*, *Life*, *Newsweek*, *Christian Science Monitor* и всех главных агентств печати. Выступление Меймана вызвало огромный интерес. На следующий день появились сенсационные сообщения на первых страницах всех ведущих газет в США. Затем в общественно-политических журналах были напечатаны статьи с кричащими заголовками: «Человек из Лос-Анджелеса создал луч света ярче Солнца»; «Поразительное открытие луча смерти»; «Свет ярче Солнца»; «Угрожающее ужасное оружие»; «Научный прибор, сделанный из света».

Научная общественность была потрясена. Пресс-релиз Лаборатории Хьюза застал всех врасплох. Все ожидали, что, когда лазер появится, он будет основан на использовании газа или пара, как полагали Шавлов и Таунс, и сделают его в Лабораториях Белл, или в Колумбийском университете, или в какой-нибудь другой хорошо финансируемой лаборатории. И конечно, никто не ожидал, что лазер будет основан на кристалле розового рубина.

Новость о создании лазера произвела настоящий взрыв в финансировании лазерных проектов. Ученые, которые уже занимались этой работой, изменили направление своих исследований. Лазерными проектами стали заниматься и «новички», работавшие раньше в других областях.

В 1961 г. Мейман перешел на работу в компанию «Quantatron». В 1962 г. он организовал компанию «Korad» и стал ее президентом. Фирма производила мощные рубиновые лазеры с модулированной добротностью, излучающие гигантские импульсы. В 1968 г. Мейман создал компанию «Maiman Associates».

Теодор Мейман был удостоен ряда престижных наград за свое выдающееся достижение.

Он был награжден американскими научными премиями Фанни и Джона Герца (1965) и Оливера Бакли (1966). В 1984 г. его наградили израильской премией Вульфа по физике и приняли в Чертот Славы национальных изобретателей (США). В 1987 г. ему вручили Премию Японии в области электрооптики, которая считается эквивалентной Нобелевской премии. Он состоял членом американских Национальной академии наук и Национальной инженерной академии и был дважды номинирован на присуждение Нобелевской премии за создание лазера. Таунс отметил выдающиеся достижения Меймана в своей Нобелевской речи, произнесенной 11 декабря 1964 г. Он сказал: «Первый действующий лазер, в котором использовалось оптическое возбуждение ионов хрома в рубине, испускающих красный свет, был продемонстрирован Мейманом в 1960 г. Он выбрал, как тогда казалось, довольно трудный путь, решив получить инверсию населенностей между основным и возбужденным состояниями иона хрома. <...> Мейман блестяще справился с этой задачей...»

Многие университеты мира удостоили Меймана почетных степеней. Последнюю из них он получил в 2002 г. в Университете Саймона Фрезера в Ванкувере (Канада), где работал и жил с женой Кэтлин в последние годы. Теодор Мейман умер 5 мая 2007 г. в Ванкувере.

Я благодарю госпожу Кэтлин Мейман, которая с энтузиазмом приняла мое предложение перевести замечательную книгу ее мужа и любезно предоставила мне авторское право издать книгу в России в год пятидесятилетия создания лазера.

Лазерная одиссея

Т.Мейман

В конце июля 1959 г. я закончил мазерный проект и сделал миниатюрный рубиновый мазер, охлаждаемый жидким азотом. С начала августа я вновь стал думать о возможности создания лазера. От первых размышлений на эту тему меня отвлекла работа по усовершенствованию мазера. Теперь я мог полностью сосредоточиться на них.

Гонка за светом

В это время в других лабораториях уже велись интенсивные исследования в данном направлении. Катализатором стала широко разрекламированная статья Артура Шавлова и Чарльза Таунса в журнале «Physical Review» [1]. Благодаря ей на эти работы стали выделять деньги по правительственным контрактам и контрактам с промышленными и университетскими научными лабораториями. Многие ученые, которые не изучили внимательно статью, считали, что сделать лазер можно, просто осуществив идеи, которые обсуждались в публикации Шавлова и Таунса. Это было весьма наивное и ошибочное представление.

Группа Таунса из пяти ученых в Радиационной лаборатории Колумбийского университета получила правительственный контракт на создание лазера на парах калия в соответствии с концепцией статьи [1]. Несколько хорошо финансируемых лазерных проектов осуществлялись в Лабораториях Белл Телефон. Одно из таких исследований, инициированное Шавловым, проводилось группой из шести ученых в отделе твердого тела и курировалось Альбертом М.Клогстоном. Кроме того, в Лаборатории Белл были организованы две группы, которые пытались создать газовый лазер. Одной группой руководил Дж.Г.Сандерс из Оксфордского университета, который находился в Лаборатории Белл в творческом отпуске, а другую возглавлял бывший студент Таунса Али Джаван.

Интенсивные работы по лазерам велись и во многих других лабораториях в США. Компания TRG получила правительственный контракт на 1 млн долл. Кроме того, лазерные исследования проводились в Массачусетском технологическом институте и в компаниях IBM, GE, RCA и «Westinghouse». Охота за лазером началась также в лабораториях Европы и Азии. Важные исследо-

вания проводились, в частности, в Советском Союзе Н.Г.Басовым и А.М.Прохоровым в Физическом институте им.Лебедева.

Попытки компании TRG создать лазер следует отметить особо. Эта небольшая технологическая компания была организована группой ученых, которые заинтересовались идеями Гордона Гоулда. Во время появления публикации [1] Гоулд был аспирантом в Колумбийском университете. По случайному стечению обстоятельств он подал патентную заявку на лазерную систему, которая была очень похожа на систему Шавлова и Таунса. Основное отличие между двумя предложениями заключалось в выборе рабочей среды: Гоулд планировал использовать пары натрия вместо калия. Впоследствии Гоулд долго с боем выяснял с Шавловым и Таунсом, кто у кого заимствовал идею использования паров щелочных металлов. Но это не имело никакого значения, потому что ни та, ни другая система никогда не работала.

Во время холодной войны конкуренция между США и Советским Союзом была особенно напряженной. После успешного запуска русского спутника в 1957 г. Конгресс США создал новый департамент — Агентство по передовым исследовательским проектам (Advanced Research Project Agency, ARPA). Агентство должно было обеспечить надлежащий уровень современных исследований в надежде избежать подобного конфуза в будущем. Компания TRG подала на основе идей Гоулда заявку в ARPA на контракт суммой в 300 тыс. долл. Так как агентство располагало очень большими деньгами на финансирование научных проектов и искало возможности для «инвестирования», они выделили компании TRG *один миллион долларов!*

Я упомянул выше лишь наиболее значимые работы по лазерной тематике, о которых знал, с целью подчеркнуть, что во всем мире уже шло напряженное соревнование. И эти исследования хорошо финансировались и выполнялись очень компетентными учеными.

Почему же я захотел принять участие в этой гонке?

Потому что знал, какие проекты предлагались разными людьми. Конечно, мне не были известны детали всех исследований. Но обычно ученые не делают особенных секретов из своих научных занятий. Они публикуют статьи и выступают на конференциях. Я видел, что пока все предложения создать лазер были весьма туманными. Конечно, это был просто обмен информацией и стимулирующими идеями. Ясно также, что другой целью таких

статей было «застолбить участок». Во всяком случае мне не казалось, что кто-нибудь был близок к решению проблемы. Что же было в действительности? На самом деле пока еще не было предложено *никакой практически осуществимой идеи создания лазера.*

Оглядываясь назад, сейчас я вижу, что был тогда весьма самонадеян. Я собирался вмешаться в определенном смысле в технологические Олимпийские игры. Это было международное соревнования наивысшего уровня. Но мой соревновательный дух победил мои сомнения. Меня целиком захватила мысль, что я смогу начать работать в высшей лиге над увлекательным проектом, который требует решения очень многих вопросов и проблем.

Нужно иметь в виду: было совсем не очевидно, что кому-нибудь удастся когда-нибудь получить *когерентный* свет. Ведь прежде это не было сделано! Братья Райт по крайней мере могли посмотреть на небо и увидеть там летающих птиц.

Сразу же возникла проблема. Администрация Лаборатории Хьюза, в которой я работал, не была склонна оплачивать мои исследования по лазерам. Лаборатория Хьюза финансировалась по контрактам Правительства США. До весны 1959 г. моя работа финансировалась в их рамках, а затем — из общего исследовательского фонда лаборатории. В принципе этот фонд тоже был правительственным, так как он выделялся лабораторией для покрытия накладных расходов по контрактам, но администрация имела право использовать его по своему усмотрению. Неудивительно, что финансирование из общего фонда хотели бы получить многие сотрудники, между ними всегда существовала конкуренция, и поэтому мой проект изучали очень тщательно. Лаборатория Хьюза в основном занималась разработкой электронных приборов для военных самолетов. С какой стати она должна была интересоваться лазером?

Я старался не обращать внимания на отсутствие моральной поддержки и отрицательное отношение администрации к моему проекту и начал обдумывать план работы. Но в каком направлении пойти?

Я не собирался идти по пути, предложенному Шавловым и Таунсом. Многие тогда уже пытались осуществить их идею, и меня не вдохновляла мысль присоединиться к этой толпе. Были и другие причины, по которым я отверг идею с щелочными парами. Шавлов и Таунс планировали использовать очень агрессивный химически элемент калий, агрессивность которого еще больше возрастает при нагревании до температуры духовки, что требуется в этом проекте. Перспектива иметь дело с потенциальными проблемами коррозии и примесей меня совсем не привлекала. А главное, мой анализ показал, что аргументация авторов [1] была существенно ошибочна и что предлагаемая ими система имела мало шансов на

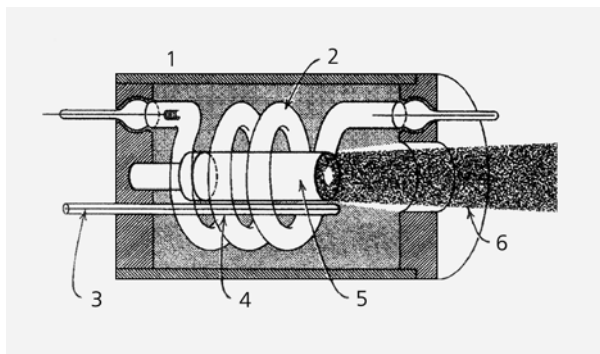


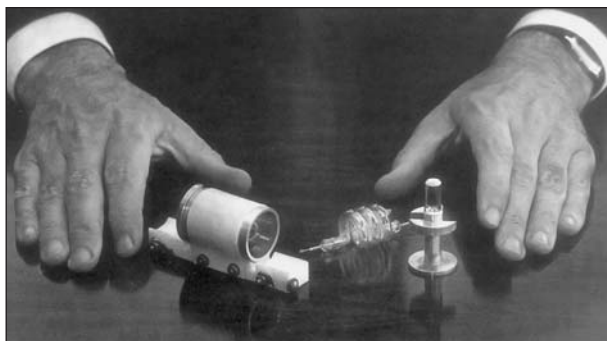
Схема рубинового лазера. 1 — полированный алюминий; 2 — лампа-вспышка; 3 — поджигающий электрод; 4 — кварцевая трубка; 5 — рубин; 6 — луч света.

успех или даже вообще их не имела. Казалось удивительным, что вариант с парами щелочных металлов исследовался многими учеными.

Джаван и Сандерс, о которых я уже упоминал, выдвинули другой подход. Они (и независимо Гуулд) предложили передавать энергию возбуждения атомам в газообразном состоянии за счет столкновений с другими атомами и электронами в электрическом разряде. Эти ученые надеялись таким способом достигнуть не только инверсии населенности, но и получить усиление, достаточное для работы лазера.

Естественно, я серьезно рассмотрел возможности использования газовых сред. Благодаря своей диссертации я хорошо знал вакуумные системы, умел работать с газами и уже имел дело с методом возбуждения атомов в столкновениях с электронами. Но приобретенный мной опыт говорил, что процессы, происходящие в электрическом разряде, очень сложны. Вероятность возбуждения атома на конкретный энергетический уровень в разряде очень трудно рассчитать и определить. Число уровней, на которые атомы и ионы могут возбуждаться, очень велико. Возбужденные состояния атомов и ионов изменяются в процессе разнообразных каскадных переходов на другие уровни, и коэффициенты ветвления для этих переходов трудно найти. Число возможных переходов огромно, и, даже используя современные компьютеры, невозможно выполнить *детальный количественный анализ.*

Физический процесс, предложенный Джаваном и Сандерсом, был интересен в принципе, но они не привели никаких конкретных данных. Так как многие параметры, необходимые для конструирования, нельзя было рассчитать, им нужно было выполнить много тщательных экспериментов для того, чтобы подобрать ток разряда, давление газа, размер газовой камеры и т.д. и создать устройство, которое могло бы оказаться действующим, — *что они и делали.* Они даже не могли предсказать уверенно, на какой длине волны мож-



Самый первый лазер.

но ожидать появления лазерного излучения в случае успеха.

Поэтому от идеи создать газовый лазер я также отказался.

Мне нравилось искать ответы на трудные вопросы, но почему же я тогда так старательно избегал иметь дело со сложными системами? Мне трудно передать ощущения, которые испытываешь, решая новую проблему, когда, несмотря на оптимистическую перспективу, существует мучительное сомнение, а возможно ли решение вообще?

Мы знаем *теперь*, что можно сделать лазеры самых разнообразных типов. Но тогда — в 1959 г., мы этого *не знали*. Мы даже не знали, а можно ли вообще сделать лазер. Если бы это было так просто, как кажется теперь, то первоклассные и хорошо финансируемые группы Шавлова, Таунса, Сандерса, Джавана, Гоулда и другие, которые усиленно занимались этой проблемой в течение двух предыдущих лет, создали бы лазер.

Моя стратегия заключалась в том, чтобы изучить только те потенциальные системы для создания лазера, которые не требовали бы затраты слишком больших усилий на конструирование устройства. Я решил исследовать *твердые кристаллы*.

Основное привлекательное свойство кристаллов для меня — простота. В отличие от газового разряда, схема энергетических уровней кристалла очень простая. Число его возможных энергетических состояний относительно невелико, и в целом все параметры кристалла, необходимые для оценки перспективы его использования в качестве среды для лазера, можно рассчитать или измерить. Если построить адекватную модель, то можно *количественно* проанализировать такую систему.

Другое принципиальное преимущество кристаллов — относительно высокий *коэффициент усиления*. Поэтому кристаллическая лазерная среда может иметь небольшой размер, что устраняет проблему разработки специальных зеркал. И действительно, в своем первом лазере я использовал кристалл длиной всего лишь 2 см. Наоборот, коэффициент усиления первого *газового лазера*

был настолько низким, что этот лазер не мог работать при длине 60 см даже при использовании зеркал с очень высоким коэффициентом отражения. Он заработал лишь после того, как его длина была увеличена до 100 см.

Идея использовать твердую среду привлекла меня также потому, что в этом случае не надо иметь дела с вакуумными насосами, проблемой примесей, аппаратурой для работы с газами и сложными механизмами для юстировки зеркал. Я мог нанести простое серебряное покрытие прямо на кристалл, точно так же, как я делал это в моем небольшом рубиновом мазере. Суть была в том, что конструкция лазера на кристалле в принципе могла быть очень простой, компактной и надежной.

Забавно — в некоторых изложениях истории создания лазера утверждается, что я стремился создать обязательно *практический* лазер, в отличие от других исследователей, которые хотели просто продемонстрировать эффект получения когерентного света. Но это не так. Я не стремился создать практическое устройство; прежде всего, устройство должно было быть простым. Хотя это — триумф: простые устройства всегда оказываются более практичными.

С самого начала я выбрал для исследований *рубиновый кристалл*.

Кристалл рубина получается в результате добавления небольшого количества примеси окиси хрома в прозрачный, как вода, кристалл окиси алюминия. Содержание примеси хрома в драгоценном рубине составляет около 0.5%. Но даже в таком малом количестве окись хрома придает насыщенный красный цвет камню. Кристаллы рубина — одни из самых твердых драгоценных камней, тверже их только алмаз.

В различных устройствах обычно используются не драгоценные рубины, а искусственные. В контролируемых лабораторных условиях можно вырастить гораздо более оптически совершенные кристаллы, которые почти не содержат никаких нежелательных примесей, в отличие от природных камней. Концентрация хрома в искусственно выращиваемых кристаллах подбирается примерно в 10 раз меньше, чем в драгоценном рубине, поэтому его красный цвет более светлый и он называется *розовым рубином*.

Почему я выбрал рубин в качестве потенциального кандидата для создания лазера? У меня в лаборатории уже было несколько рубиновых кристаллов, которые остались после работы с рубиновым мазером. Но гораздо важнее, что я достаточно хорошо знал интересные оптические свойства кристалла рубина.

Однажды я проводил предварительные эксперименты с некоторыми флуоресцентными кристаллами (не только с рубином). Я возбуждал флуоресценцию коротковолновым ультрафиолетовым источником и просто наблюдал ее визуально.

В лабораторию зашел мой непосредственный начальник Джордж Бирнбаум. Я показал ему светящийся рубин и сказал в шутку: «Эй, Джордж, смотри — это лазер». И он ответил: «Да, да, конечно!» В этот момент у меня возник лишь первый проблеск надежды, что со временем я смогу получить лазерное излучение в рубине.

Рубин флуоресцирует не только при облучении ультрафиолетовым светом, но также излучает красный свет при облучении синим или зеленым светом. Именно благодаря наличию широких синей и зеленой полос поглощения рубин имеет красный цвет. Когда зеленый фотон падает на кристалл и поглощается в нем, примесный ион хрома переходит из своего основного состояния в возбужденное. Хотя ион хрома, находясь на возбужденном уровне, может испустить спонтанное излучение, в действие вступает другой процесс. В этом конкурирующем процессе участвуют тепловые колебания кристаллической решетки, которые взаимодействуют с возбужденным ионом, в результате чего большая часть его энергии возбуждения переносится на другой, расположенный немного ниже, возбужденный уровень иона хрома в рубине. На этом *метастабильном* уровне ион хрома находится некоторое время. Этот процесс гораздо более вероятен, чем первый процесс, и доминирует. Энергия испущенных красных фотонов меньше, чем энергия зеленых, которые запустили процесс. Потерянная энергия передается кристаллу рубина в виде тепла. При высоких уровнях возбуждения рубин нагревается.

Когда я начал детально изучать оптические свойства рубина, я не считал, что рубин — предпочтительный кристалл для создания лазера. Я довольно долго думал, что для этой цели можно найти хороших кандидатов среди флуоресцирующих твердых материалов. И сначала я продолжал изучать рубин просто потому, что этот кристалл был одним из возможных кандидатов.

Я построил модель, которую можно было проанализировать математически, и вывел так называемые *кинетические уравнения*, которые описывают различные механизмы, участвующие в процессе флуоресценции. Я также установил простые интуитивные критерии получения условий для работы лазера. Эта модель и эти уравнения стали *стандартным подходом*, которым впоследствии пользовались другие исследователи при создании кристаллических лазеров.

Решив уравнения, описывающие модель, я смог определить, какие свойства материала имеют важное значение для создания лазера. Некоторые из этих характеристик были приведены в литературе, некоторые нужно было измерить или рассчитать из других измерений. Используя известные и оцененные значения соответствующих параметров рубина, я выполнил некоторые предварительные расчеты и выяснил, что для получения лазерного излучения в рубине кристалл необходимо возбуж-

дать *очень яркой* лампой накачки. Тогда я решил поискать другие перспективные кристаллы, которые для получения лазерного излучения можно было бы возбуждать менее яркой лампой. В литературе имелись данные о спектрах флуоресценции кристаллов с примесями редкоземельных химических элементов. Ион одного из них, гадолиния, излучает очень узкие линии флуоресценции в ультрафиолетовой части спектра. Перспектива использовать его в подходящей кристаллической решетке в качестве возможного материала для лазера очень заинтересовала меня.

Здесь я пожадничал. Если бы мне удалось получить когерентный свет, это было бы важным достижением. Но если бы это удалось сделать с гадолинием, я бы получил когерентное излучение в ультрафиолетовой области. И тогда прыжок по частоте по отношению к мазеру составлял бы уже более 25 тыс. вместо только 10 тыс.! Однако мои дальнейшие расчеты показали, что кристаллы с примесью гадолиния еще труднее возбудить для получения лазерного излучения, чем рубин. И я вновь вернулся к рубину, чтобы более тщательно обдумать эту проблему.

Препятствия и решения

Случилось так, что я перестал исследовать рубин... на некоторое время. Но причиной тому были не мнение Шавлова и не давление Бирнбаума. Это произошло из-за статьи Ирвина Видера. Он был аспирантом, которого я научил работать на моей установке, чтобы Уиллис Лэмб отпустил меня после защиты диссертации. Ирв тоже защитил диссертацию в Стэнфорде и перешел в Исследовательскую лабораторию «Westinghouse» в Питтсбурге. Пытаясь усовершенствовать рубиновый мазер, он измерил квантовый выход флуоресценции рубина (число фотонов флуоресценции, деленное на число фотонов накачки). На основании своих измерений Видер сообщил в статье, вышедшей в ноябре 1959 г. [2], что квантовый выход флуоресценции рубина составляет *всего лишь 1%*.

Этот результат вызвал у меня большое беспокойство. Мои модельные расчеты показали, что для возбуждения рубина требуется яркий источник накачки и, следовательно, получить лазерное излучение в нем будет довольно трудно. Тем не менее я пришел к выводу, что это можно сделать, несмотря на то, что Шавлов настойчиво утверждал обратное. Однако в своих расчетах я предполагал, что квантовый выход флуоресценции рубина близок к 100%. Если же подставить в расчеты результат Видера, действительно окажется, что рубин не годится для создания лазера.

Я не сомневался в достоверности результата измерений Ирва. Он был моим протеже в Стэнфорде, и поэтому я верил его результатам. Я очень огорчился и начал думать о других возможностях.



Фотография не самого первого лазера, приведенная в пресс-релизе в июле 1960 г. и перепечатанная затем во многих газетах и журналах.

Но, оглядевшись вокруг, не нашел никаких систем, которые могли бы представить интерес для моей цели. Тогда я решил вернуться к рубину и изучить его более внимательно. Я понимал, что квантовый выход флуоресценции кристалла рубина изменить невозможно, так как это его фундаментальное свойство. Но, с другой стороны, мне хотелось узнать, в чем проблема и чем вызван такой низкий квантовый выход.

Примерно в это время я решил заказать прибор, необходимый мне для измерений, — монохроматор, содержащий дифракционную решетку, которая выделяет излучение определенного цвета подобно оптическому фильтру, но более точно, чем призма. Монохроматор, который был мне нужен, производила фирма «Bausch and Lomb». Это был точно такой же монохроматор, с которым я работал в аспирантуре. Он стоил 1500 долл.

Заказ на приобретение такого капитального оборудования должен был подписать руководитель отдела атомной физики Гарольд Лайонс. Он был против этой покупки. Интересно, что в Стэнфорде такой проблемы не было. Лайонс, как и Бирнбаум, считал, что я занимаюсь бесплодным делом. Разве Шавлов не сказал, что рубин не может работать? Населенность основного состояния нельзя уменьшить. Гарольд сказал мне: «Почему бы вам не заняться чем-нибудь полезным, например, компьютерами?» Мне опять пришлось защи-

щать свой проект. К счастью, мне удалось убедить и Гарольда. Я получил монохроматор, и мне разрешили продолжить эксперименты.

Почему я так привязался к рубину?

Кристалл рубина имеет много нужных качеств. С ним удобно работать, потому что он очень устойчивый и твердый. У него имеются широкие полосы поглощения, которые можно использовать для переноса энергии от некогерентной лампы накачки, и, в отличие от других кристаллов, которые я исследовал, рубиновый лазер должен излучать видимый свет. Другие кристаллы (в том числе темный рубин) излучают в инфракрасной области, что менее желательно, и, кроме того, они требуют криогенного охлаждения. А с криогеникой я твердо решил дела больше не иметь. Если же лазер на розовом рубине заработает, он будет работать при комнатной температуре.

Я не мог *переделать* кристалл рубина как таковой. Но я рассуждал, что если я смогу понять, почему в рубине теряется 99% энергии его возбуждения, это поможет мне найти другие материалы, которые бы сохраняли полезные качества рубина, но в то же время не обладали бы фатальным свойством, которое, как казалось, было ему присуще.

Я рассмотрел очень критически и детально процесс флуоресценции розового рубина и продумал эксперименты для измерения различных характеристик, которые могут влиять на его квантовый выход. Я делал один эксперимент за другим, но никак не мог обнаружить возможные механизмы утечки энергии возбуждения. В недоумении я решил сам измерить квантовый выход флуоресценции рубина. И мои измерения показали, что квантовый выход флуоресценции рубина был *около 75%, а не 1%*, как сообщил Видер... Это была фантастика!

Новые данные решающим образом изменили ход моих дальнейших исследований. Я испытал сильный подъем и приобрел уверенность в оптимизм. Рубин опять вернулся в игру!.. Или нет?

Теперь у меня было достаточно информации, чтобы начать разрабатывать конкретную конструкцию лазера. Но как накачивать рубин? Какие размеры и форму должен иметь кристалл рубина?

Я знал, что нужна очень яркая лампа. Самой яркой, имевшейся в моем распоряжении, была дуговая ртутная лампа высокого давления АНБ производства компании GE. Она была не только одним из наиболее ярких лабораторных источников, но и излучала энергию в основном в зеленой и синие-фиолетовой областях спектра. Такое излучение хорошо подходит для возбуждения рубина.

Я сделал чертеж устройства с лампой АНБ, расположенной в одном фокусе эллиптического цилиндра; маленький рубиновый стержень должен был помещаться в другом его фокусе. Эллиптический рефлектор обладает тем свойством, что точечный источник света, помещенный в одном из фокусов эллипса, отображается в другом. Я соби-

рался использовать эллиптический цилиндр с тщательно отполированной зеркальной внутренней поверхностью.

Но здесь возникла проблема. Мои предварительные расчеты этой конструкции показали, что она, хотя и должна работать, но — на самом пределе. Я проанализировал конструкцию более детально, пытаясь оптимизировать и улучшить ее, но вновь убедился в том, что она сможет работать только на пределе.

Меня мучили сомнения. Можно ли вообще получить когерентный свет? Действительно ли все остальные исследователи ошибаются, когда утверждают, что рубин — неподходящий материал для лазера? А вдруг окажется, что мой потенциальный лазер не заработает, но я был очень близок к цели? Как я узнаю, в чем причина? Может быть дело в том, что его конструкция имеет недостаток, а может быть, причина более фундаментального свойства. Бирнбаум был убежден, что я занимаюсь бессмысленным делом, и это тоже не помогало мне.

Конструкция лазера, которая могла оказаться успешной только на пределе своих возможностей, совсем не вдохновляла меня. Я обдумывал проблему вновь и вновь, пытаюсь рассмотреть ее с новых сторон. Испытывал разочарование и неверие в свои силы. Чувствовал, что нахожусь где-то на пороге решения, но в то же время оно ускользало от меня.

Я вернулся к своей аналитической модели, обдумал различные варианты и решил сформулировать требования к лампе накачки для рубина в другом виде. Я рассчитал эквивалентную температуру *черного тела*, которую должна иметь лампа накачки. Например, обычная вольфрамовая лампа накаливания является почти идеальным черным телом с яркостной температурой 2800 К.

Согласно моим расчетам, яркостная температура, необходимая для получения лазерного излучения в рубине, была примерно 5000 К. Эта температура близка к температуре поверхности Солнца! В принципе я мог бы сделать солнечный коллектор (зеркальный или линзовый) для фокусировки солнечного света прямо на рубин, но опять такая конструкция могла бы работать только на пределе.

Однако теперь, когда я выразил требования к лампе накачки с помощью понятия яркостной температуры, я стал рассуждать по-другому. Я вспомнил, что как-то читал статью о стробоскопических лампах-вспышках, используемых в фотографии. В статье говорилось, что яркостная температура стробоскопических ламп может превышать 8000 К!

Ага, это было именно то, что нужно!

Большинство ученых думали о создании непрерывного лазера. И я тоже начал свои исследования с этого. Но зачем ставить себе такое ограничение?

В настоящий момент я только пытался показать, что когерентный свет можно получить в принципе. Кроме того, импульсные источники света тоже можно использовать для разных приложений, иногда они оказываются даже предпочтительными, как, например, в радарах, при сварке и сверлении отверстий и т.д. Я вернулся к своей аналитической модели, модифицировал уравнения с учетом импульсного источника света и проанализировал результаты, чтобы понять, какую конкретную конструкцию должен иметь лазер. Мне уже было ясно, что наиболее важный параметр источника света — его *яркость*. Расчеты также показали, что требование, предъявляемое к яркости лампы, фактически не зависит от размеров кристалла рубина и содержания хрома в нем в довольно широких пределах. Модель рассматривала трехуровневую систему (соответствующую рубину), у которой нижний лазерный уровень отвечает основному состоянию.

Затем я тщательно просмотрел все каталоги ламп-вспышек, которые мог найти, и выбрал подходящие лампы. Наибольшую интенсивность имели три спиральные лампы-вспышки FT-506, FT-503/524 и FT-623 производства компании GE. Мои расчеты показали, что, используя даже самую маленькую лампу FT-506, я получу надежный, примерно двух-трехкратный, запас по яркости для возбуждения лазера. Так как для ее питания нужен гораздо менее мощный источник, а размеры кристалла были не критичны, я решил первую конструкцию лазера сделать, используя эту лампу. Но для страховки я также заказал по нескольку запасных ламп всех размеров.

К сожалению, в декабре 1959 г. было объявлено, что Лаборатория Хьюза переедет из помещения в Калвер Сити Квонсет в новое здание, арендованное в Малибу. Этот переезд отнял у меня по крайней мере три недели.

Да будет «когерентный» свет

Расчеты и измерения, которые я выполнил в последнее время, вселили в меня оптимизм и надежду, что лазер сделать можно. Напряжение возрастало, и в своих мечтах я стал представлять, что мне это действительно удалось. Вкус победы был бы особенно сладок, так как я пошел путем, который отвергли наиболее авторитетные «большие люди».

Однако по-прежнему меня беспокоила мысль, что, возможно, я упустил что-то. Может быть, существует какое-то непреодолимое фундаментальное препятствие, о котором я не подозреваю? В довершение ко всему мой приятель — физик Питер Франкен, который был профессором в Мичиганском университете и пользовался большим авторитетом в области оптики, планировал прочитать курс лекций в университете летом 1960 г.



Лазерная установка «Нова» в Ливерморской лаборатории им. Лоуренса и Т. Мейман со своим первым лазером (пресс-релиз фирмы TRW, 1980 г.).

и одну из них назвал «Почему невозможно сделать лазер».

Я вновь и вновь анализировал свою модель, пытаюсь найти какие-нибудь процессы, которые могли ускользнуть от моего внимания и могли бы сделать модель неверной. И действительно, нашел пару возможных потенциальных проблем, связанных с предполагаемыми нежелательными переходами между энергетическими уровнями. Профессор Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе Роберт Саттен — теоретик, специализирующийся в области теории кристаллического поля, работал консультантом в Лаборатории Хьюза. Я попросил Боба проверить мои предположения. Он выполнил тщательные расчеты, и в результате мы пришли к выводу, что я иду правильным путем.

Прежде чем прямо приступить к конструированию устройства, я решил провести специальные эксперименты для проверки адекватности моей модели. Я изготовил кубик из розового рубина со сторонами длиной в 1 см. Ось кристалла была перпендикулярна двум противоположным граням куба. Поместив этот кубик между двумя параллельными пластинками, я сделал таким образом микроволновый резонатор. Резонансная частота резонатора была подобрана равной величине

не естественного расщепления уровня рубина в основном состоянии. Эти подуровни в основном состоянии используются в рубиновом лазере. Данная установка была предназначена для измерения изменений населенности основного состояния рубина. Напомню, что Шавлов утверждал, что населенность основного состояния ионов хрома в рубине невозможно существенно уменьшить и поэтому рубин не годится для создания лазера. Мои же расчеты показали, что это сделать можно, и я решил подтвердить свои оптимистические выводы экспериментально.

Я соединил одну из двух других параллельных граней с концом полированного кварцевого стержня — световода. Другой его конец был соединен с лампой-вспышкой FT-506. Третий набор параллельных граней куба использовался для зондирования на различных длинах волн света. Я следил за населенностью основного состояния рубина по «нагрузке» на микроволновом резонаторе, используя микроволновые свойства рубина, которые я изучил, работая с рубиновым лазером.

Когда рубин освещался вспышкой от лампы FT-506, нагрузка на резонаторе действительно изменялась. Она уменьшалась, потому что, как и ожидалось, количество ионов хрома в основном

состоянии становилось меньше. Но еще более важно было то, что *величина* уменьшения населенности в основном состоянии, равная 3%, была очень близка к значению, которое я предсказал на основании анализа экспериментальных параметров. Этот результат доставил мне огромную радость, так как он дополнительно подтвердил применимость моей модели и анализа. Результаты были опубликованы в статье [3].

Теперь я почувствовал сильное волнение. Больше уже не было необходимости проверять что-нибудь еще и наступило время приступить к конструированию лазера. Сначала я хотел использовать какой-нибудь вариант конфигурации с эллиптическим цилиндром, но нужна была прямая лампа в виде стержня, а интенсивность свечения прямых ламп была недостаточна. Я решил использовать спиральные лампы, которые у меня были, потому что не хотел тратить время на разработку специальной лампы. Агент по продаже ламп сказал мне, что лампа FT-623 настолько яркая, что если поднести к ней металлическую мочалку, то она загорится. И тут мне пришло в голову, что никакая фокусирующая система вообще не требуется. Яркость излучения, которая достигается в фокусе зеркала или линзы, может лишь приблизиться к яркости источника, но не превысить ее. Это следствие известного второго закона термодинамики. А почему бы не поместить кристалл очень близко к лампе? Почему бы не поместить его просто *внутри* спиральной лампы? Для того чтобы *собрать* больше света, я поместил спиральную лампу внутри отполированного алюминиевого цилиндра. Я использовал небольшой кристалл розового рубина в форме цилиндрического стержня диаметром 3/8 дюйма и длиной 3/4 дюйма (примерно 1×2 см), который можно было вставить внутрь спирали лампы. Плоские торцы рубинового цилиндра были отполированы, параллельны друг другу и перпендикулярны оси цилиндра. Зеркала на торцах приготавливались напылением слоев серебра.

В идеальном случае на одном торце рубинового стержня должно находиться толстое, непрозрачное серебряное покрытие с высоким отражением, а на другом — очень тонкое, частично пропускающее свет, через которое должен выходить лазерный луч. Я выбрал серебро для приготовления зеркала, потому что оно имеет наибольший коэффициент отражения среди всех металлов на длине волны красного излучения рубинового лазера. Однако серебро быстро становится тусклым, поэтому пропускание тонкого слоя серебра выходного зеркала менялось со временем, т.е. слой был нестабильным.

Я решил эту проблему, напылив *толстые* слои серебра на оба торца кристалла. В покрытии на одном из торцов я процарапал крошечное отверстие, через которое должен был выходить лазерный луч. Лазерная головка имела размер и форму обычного небольшого стакана. Как видно из рисунка, конструкция лазера была *очень простая*.

Когда я заканчивал конструирование лазера, Боб Хеллварт, один из моих коллег в отделе атомной физики, спросил меня: «А как ты узнаешь, что он заработал?»

Сначала я опасался, что если оптическое качество кристалла рубина будет сильно отличаться от идеального, то его дефекты могут помешать получить лазерное излучение. Тщательный анализ с учетом влияния дефектов показал, что, если мне удастся значительно превысить порог возбуждения лазерного излучения в рубине, я смогу обнаружить когерентное излучение даже в кристалле плохого качества.

Что же конкретно я надеялся увидеть? Я планировал регистрировать красный свет, излучаемый рубином через маленькое отверстие в выходном серебряном зеркале, и ожидал увидеть три эффекта: уменьшение времени затухания флуоресцентного уровня, сжатие излучения в пучок и значительное уменьшение спектральной ширины красного света. Это следует из анализа лазерного процесса.

Лазерный процесс начинается, когда кристалл рубина возбуждается лампой-вспышкой и ионы хрома переходят на метастабильный флуоресцентный уровень. Ионы теряют свою энергию, излучая случайным образом фотоны в красной области спектра. Это — хорошо известная красная флуоресценция (спонтанное излучение). Если уровень возбуждения достаточно высок, достигается требуемое условие инверсной населенности. В этом случае число ионов хрома, находящихся на верхнем метастабильном флуоресцентном уровне, больше, чем их число в основном состоянии. Поэтому ионы хрома могут испускать *стимулированное* излучение наряду с обычным спонтанным. Так как теперь метастабильный уровень опустошается гораздо быстрее, чем обычно, время жизни флуоресценции уменьшается. Это сокращение времени жизни можно наблюдать, возбуждая красное свечение рубина лампой-вспышкой и регистрируя его затухание с помощью фотоэлемента, соединенного с осциллографом.

Когда рубин находится в состоянии с инверсной населенностью, он становится усилителем. Красные фотоны *усиливаются* во время распространения в кристалле. Начинается важный процесс селекции. Сначала красные фотоны испускаются в произвольных направлениях. Однако фотоны флуоресценции, испускаемые под большими углами к механической оси рубинового цилиндра, выходят через боковые стороны кристалла и таким образом теряются. С другой стороны, фотоны, испускаемые вдоль оси кристалла или под небольшими углами к его оси, оказываются фактически в ловушке. Они отражаются от противоположных зеркал на торцах кристалла и распространяются взад-вперед в кристалле. Аксиальные фотоны усиливаются во время их распрост-

ранения в кристалле и генерируют новые фотоны в том же направлении — вдоль или почти вдоль оси кристалла. В результате *стимулированное* излучение с возбужденного метастабильного уровня быстро становится доминирующим и из маленького выходного отверстия оно должно выйти в виде узкого пучка.

Красное (спонтанное) излучение флуоресценции рубина испускается в диапазоне частот, распределение которых описывается колоколообразной кривой. В состоянии инверсной населенности наибольшее усиление достигается в максимуме этой кривой. В результате фотоны с частотами вблизи центра распределения оказываются в более благоприятных условиях, так как усиливаются сильнее во время распространения туда и обратно в результате многократных отражений от зеркал. Именно поэтому частотное распределение лазерного излучения оказывается узким, т.е. *ширина лазерной линии* мала.

Итак, я собирался наблюдать в экспериментах сокращение времени жизни флуоресценции рубина при высоком уровне возбуждения лампой-вспышкой. С повышением мощности возбуждения рубина интенсивность его флуоресценции должна возрастать пропорционально до момента достижения порога. Но выше порога небольшое увеличение мощности возбуждения должно вызывать гораздо более сильное изменение интенсивности выходного излучения, так как монохроматор в сочетании с детектором более чувствителен к воздействию узкого луча света с небольшой спектральной шириной. Я также планировал независимые измерения сужения спектральной ширины линии излучения рубина с помощью спектрографа.

В апреле 1960 г., когда я уже заканчивал подготовку к экспериментам с рубином, Лабораторию Хьюза посетил Клогстон — шеф Шавлова в Лаборатории Белл Телефон. Клогстон заметил в разговоре (видимо, из нашей лаборатории происходила утечка информации): «Мы слышали, что вы по-прежнему занимаетесь исследованием рубина. Мы тщательно изучили возможность использования рубина для создания лазера. Он не годится для этой цели. Продолжая эти исследования, вы только зря тратите время, усилия и деньги на бесполез-

ный проект». Я подумал, может быть сотрудники Лаборатории Белл знали что-то, что я упустил?

И вот наступил день 16 мая 1960 г. — время подтвердить или опровергнуть все опасения, что «рубин не может работать» или что «вообще лазер нельзя сделать». Настал момент истины!

Лазерная головка была установлена на оптическую скамью. Лампа-вспышка была подключена к источнику питания. Поджигающий электрод был соединен с искровой катушкой, инициирующей вспышку стробоскопической лампы. Свет, выходящий из отверстия в зеркале на торце рубинового стержня, направлялся через монохроматор на фотоумножитель. Электрический сигнал с фотоумножителя подавался на вход специального запоминающего осциллоскопа производства Лаборатории Хьюза.

Мы проводили эксперимент вдвоем с Ирри Д'Хененсом. Больше в лаборатории никого не было. Сначала мы произвели пробное возбуждение флуоресценции рубина лампой-вспышкой для отладки системы детектирования. Мы установили напряжение источника питания лампы, равное примерно 500 В, возбудили флуоресценцию вспышкой лампы и стали наблюдать развертку импульса на экране осциллоскопа. Этот импульс описывал изменение во времени интенсивности красной флуоресценции рубина. Импульс затухал в течение примерно 3 мс (время жизни возможно лазерного уровня). Мы произвели необходимую настройку параметров, чтобы оптимизировать вид кривой на экране осциллоскопа.

Затем мы начали постепенно поднимать напряжение источника питания и каждый раз регистрировали импульсы флуоресценции рубина. При этом пиковая интенсивность импульса возрастала пропорционально энергии возбуждения, а время его затухания не менялось... Пока все шло, как обычно. Но когда мы подняли напряжение источника питания лампы выше 950 В, *все изменилось!* Пиковая интенсивность импульса стала резко возрастать, а время его затухания быстро уменьшилось.

Отлично! Это было именно то, что нужно!
Лазер родился!

© Перевод с английского М.Н.Сапожников

Литература

1. Schawlow A.L., Townes C.H. // Physical Review. 1958. V.112. №6. P.1940—1949.
2. Wider I. // The Review of Scientific Instruments. 1959. V.3. №11. P.995—996.
3. Maiman T.H. // Physical Review Letters. 1960. V.4. P.564—566.

Теодор Мейман не был удостоен Нобелевской премии, хотя, вне всякого сомнения, заслужил ее. Мы знаем, что мир изменился после того, как Мейман создал первый в мире лазер. И независимо от всех премий, которые он получил или не получил, он внес неоценимый вклад в мировую науку и развитие нашей цивилизации в целом.

ПРИРОДА

популярный
естественно-исторический журнал

Под редакцией

проф. Ж. К. Кольцова и проф. Л. А. Тарасевича.

Французским и немецким научным журналам предоставляется право перевода оригинальных статей и воспроизведение рисунков при условии точной ссылки на источник.

Русским изданиям перепечатка статей и воспроизведение рисунков, помещаемых в журнал «Природа», могут быть разрешены лишь по особому согласию.

ИССЛЕДОВАНИЯ

ИСТОРИЯ

1915

Национальная организация науки

Профессор Н.К.Кольцов*

Наука есть искание истины. В естествознании истина полагается единой и обязательной для всех. Вследствие этого может показаться, что наука о природе принадлежит всему человечеству и не имеет никакого отношения ни к нациям, ни к государствам и что нельзя говорить об английской физике, германской химии, русской зоологии и т.д.

Но ведь по нашему определению наука — не истина, а искание истины. И если мы обратим внимание на этот действительный характер науки, то нам станет ясным, что в настоящий период истории человечества должна существовать самая тесная связь между естествознанием, с одной стороны, и государством и национальностью — с другой. Эта связь выражается двояко.

Во-первых, вследствие национальных особенностей характера, а еще более вследствие особенностей общественного устройства в различных го-

сударствах стремление к изучению природы может варьировать в самых широких пределах, изменяться не только по степени, но и по направлению.

Никто не ожидает, конечно, чтобы у готтентотов могла возникнуть своя наука, и среди культурных наций есть, по-видимому, более и менее одаренные, склонные более к умозрению или к наблюдению, к эксперименту, к технике.

Во-вторых, естествознание в течение в особенности настоящего столетия встало на ту стадию развития, когда его успехи зависят не столько от энергии и таланта отдельных ученых, но также — и, может быть, в значительно большей степени — от организации научных исследований. И в настоящее время эта организация за очень немногими исключениями носит национальный, государственный характер.

В тот великий исторический момент, который мы переживаем, два вопроса захватывают наше

* Николай Константинович Кольцов — один из крупнейших русских ученых XX в., основоположник отечественной экспериментальной биологии, предвосхитивший главные положения современной молекулярной биологии и генетики (см. последние публикации в «Природе»: 2007. №10. С.3—37; 2008. №5. С.67—71). Статья свидетельствует о широте общественных интересов автора, совершенно конкретных, привязанных ко времени, когда шла Первая мировая война, ощущались последствия реакционной политики в области просвещения, падения экономики и пр. Как видно из сказанного Кольцовым, научные силы сопротивлялись обстоятельствам. В 1914 г. Кольцов взял на себя нелегкое в финансовом и других отношениях издание нашего журнала. Он был (сначала вместе с Л.А.Тарасевичем) главным редактором «Природы» до 1927 г. и много печатался на ее страницах.

Мы не пытались «осовременить» публикуемую здесь статью, но позволили себе незначительные купюры. Все остальное, включая написание иностранных фамилий, осталось в авторском варианте. — Примеч. ред.

внимание. Задолго до начала войны мы свыклись с мыслью о значительном превосходстве немецкой науки; действительно ли успехи немцев в естествознании так велики, и чем они объясняются?

I

Вопрос о значении немецкой науки не сходит со страниц английских естественно-исторических журналов. К нему неоднократно возвращается В.Рамсай¹; интересную статью о германской науке помещает профессор Артур Томсон в «Knowledge» (май 1915 г.). <...>

В.Рамсай (Quart. Review) приводит любопытную сводку статистических сведений об участии немецких ученых в развитии естествознания за последние четыре столетия. Эта сводка заимствована из книги Дармштедтера и Р.Дю-Буа-Реймона: «400 Jahre Pionier Arbeit in den exacten Wissenschaften». Авторы отбирают более крупные имена ученых за каждое столетие, распределяют их по национальностям, а затем подсчитывают, какой % участия в развитии естествознания падает за каждый период на немцев.

Период		Всех ученых	Из них немцев
от	до		
1500	1600 г.	176	39 = 22%
1600	1700	312	48 = 15%
1700	1800	517	72 = 14%
1800	1850	901	234 = 26%
1850	1900	1021	477 = 46%

Не надо, однако, забывать, отмечает Рамсай по поводу этой таблицы, что подсчет сделан немцами. Националистические цели такого подсчета слишком ясны, и даже для человека, стремящегося сохранить беспристрастие, слишком легко и соблазнительно допустить ошибку. Как отобрать тысячу имен естествоиспытателей за вторую половину XIX в., когда лиц, печатавших за этот период научные работы, было во много раз больше? Достаточно перелистать первый том энциклопедий — британской, немецкой, русской, чтобы убедиться в том, что %, определяющий участие нации в создании науки, не может быть установлен без самого очевидного, неизбежного произвола. Никого, конечно, не удивило бы, если бы оказалось, что в русском энциклопедическом словаре большинство помещенных имен ученых — русские.

Артур Томсон указывает еще на одно затруднение при такой статистике: кого называть немцем? Всякого ученого, пишущего свои работы по-немецки? Или того, кто сам открыто признает себя немцем? Того, кто при этом работает в Германии или Австрии? Или, наконец, того, кто по кро-

ви чистого германского происхождения? Нельзя не видеть, что статистика, основанная на последнем признаке, имела бы совсем особый характер: только такая статистика доказала бы зоологическое превосходство германской расы и дала бы повод «эвгенетикам» заключить, что победа германских «генов» в борьбе за существование должна повысить свойства зачатковой плазмы вида *Homo sapiens* или, по крайней мере, усилить способности человека к естественно-научному мышлению.

Но последнего смысла приведенная выше статистика ни в каком случае иметь не может. Вот что замечает по этому поводу А.Томсон: «Каждая нация складывается из различных расовых корней, резко отличающихся друг от друга по научным и другим качествам. Каким путем, например, историк биологической науки может удостовериться, сколько знаменитых физиологов и патологов Германии еврейского происхождения? Имеются и другие могущественные иммиграционные потоки, представленные, например, такими учеными, как физиолог Галлер, ботаник Нэгели, зоолог Келликер, математик Эйлер², которые жили и работали в Германии, но по происхождению принадлежат Швейцарии».

Можно прибавить к этому, что один из авторов вышеприведенной статистики, как показывает уже имя его (Du-Bois-Reymond), несомненно, галльского происхождения, ведет начало от гугенотов, переселившихся в Швейцарию; и только отец его, знаменитый физиолог, получивший французское воспитание в College Francais, переселился в Германию, жил и работал здесь в течение всей своей жизни.

Таким образом, рассматриваемая нами статистика ученых для сравнения рас с точки зрения эвгенетики никакого материала не дает. С отказом от расовой статистики было бы наиболее правильно немцем считать только такого ученого, который сам себя таким считает, а потому без всяких оговорок верить Дю-Буа-Реймону, что он немец. Но там, где такого публичного заявления о своей национальности нет, возможны всегда недоразумения. Так, например, в чрезвычайно любопытной речи академика Вальдена, произнесенной на 2-м Менделеевском съезде в Петрограде, приведены статистические данные о русских химиках, к числу которых он относит, само собою разумеется, себя, а также Тамана и Оствальда, как питомцев и бывших профессоров юрьевского университета и рижского политехникума.

¹ См. выдержки из его первой статьи в «Природе» за 1915 г., январь, с.158.

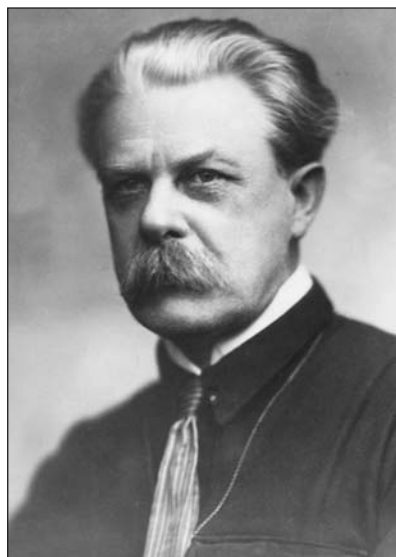
² А.Томсон ошибается относительно Эйлера: по происхождению швейцарец, он по своей деятельности принадлежит главным образом России, в которой прожил около 30 лет, был русским академиком и печатал многие труды свои в изданиях Петроградской академии на латинском языке даже в то время, когда жил в Берлине. Эйлер скончался в Петрограде, и оба сына его жили в России и состояли членами русской академии. — Н.К.

Таман на съезде был в качестве профессора уже Геттингенского университета, но против причисления себя к русским не протестовал. С другой стороны, конечно, назвать русским В.Оствальда по нынешним временам можно было бы только в шутку, между тем как еще несколько лет тому назад это было вполне естественным.

В статьях В.Рамсая и некоторых других англичан нередко приходится встречать в настоящее время утверждение, что немецкая наука велика только количеством, а не качеством своих ученых. А.Томсон, также англичанин, решительно отказывается, однако, встать на такую точку зрения. Отдавая должное заслугам русских, итальянских, шведских, датских, голландских и швейцарских ученых, А.Томсон считает приблизительно равными силы английских, французских и немецких естествоиспытателей. Приблизительно поровну представители этих трех наций распределены между иностранными членами главных академий мира (немцев — 28%), а также среди лауреатов Нобелевской премии (немцев оказалось за период 1901—1912 гг. из общего числа 58 всего 17, т.е. 29%).

Интересна составленная А.Томсоном таблица, в каждой строке которой сопоставляются три приблизительно равных по своему научному значению имени: английского, французского и немецкого ученого.

Разъясняя эту таблицу, автор сам подчеркивает ее произвольность. «Одни, например, приписывают — и, по нашему мнению, правильно — важную роль в истории науки Гёте, другие — отрицают совсем его научные заслуги. Многие сравнивают Геккеля с Гексли, другие относят Геккеля ко второму классу. Для одних равнозначущи Эрлих и А.Райт, Кох и Пастер, в глазах других эти сопоставления неудачны. Сопоставления Гельмгольца с Кельвином, Кирхгофа с Томсоном, Герца с Фицджеральдом могут также показаться лишенными перспективы. Причин для такого различия во взглядах — несколько. Одна из них: «каждый — для своей страны»; вторая: различие типов научных исследователей; наконец, третья заключается в том, что высота мыслительных способностей исследователя может не совпадать с влиянием опубликованных им работ на развитие науки. Для сравнительной оценки возникает еще одно затруднение: немало очень крупных имен едва известны широкой публике. Так, в развитии математических знаний имена Грина, Галуа и Гаусса имеют величай-



Николай Константинович Кольцов (1872—1940).

шее значение, а многие ли вне узкого круга ученых специалистов знают что-либо об этих трех гениях или хотя бы об одном из них? Маркони известен гораздо более, чем Гальвани, Эдисон — чем Вильям Гибс. Это даже естественно: работа тех, кто строит фундамент, редко видна зрителям».

Со всеми этими оговорками А.Томсон считает более или менее ясным, что заслуги англичан, французов и немцев уравниваются, хотя в каждой стране перевес может склониться в сторону той, то другой, то третьей национальности.

А.Томсон пытается далее дать характеристику типов ученого немца, француза и англичанина. Для английской работы он считает типичными «здоровый дух, правильную перспективу

и самокритику». «Французская наука отличается ясностью как точки зрения, так и стиля, индивидуальностью, оригинальностью, готовностью разорвать с традициями». «Немецкие исследователи характеризуются обстоятельностью, выучкой, прямолинейностью, тщательной техникой, убежденной верой в значение науки вообще и собственной научной работы в частности. Колоссальна настойчивость, с которой один исследователь всю свою жизнь изучает голову акулы, другой — нервную клетку, третий — сколопендру, лишь изредка допуская экскурсы в область многоножек вообще. За последние годы произошли некоторые перемены в этом отношении, но все же многие немецкие исследователи до сих пор крепко держатся старой традиции сохранять преданность раз навсегда поставленной задаче, “низменно живя и высоко мысля”, проявляя поистине промышленную продуктивность. Кроме традиции здесь чувствуется врожденная и закрепленная привычкой упорная настойчивость. Без сомнения, немецкие исследователи, подобно другим, имеют и недостатки, связанные с их достоинствами. Стремление к производительности ведет часто к поспешной и чисто количественной работе, чрезмерная специализация — к недостатку общей перспективы, зная обстоятельности — к скучнейшей растянутости. У других наций имеется особое нерасположение к многоречию в науке и к чрезмерным подробностям в описаниях, переходящих за пределы полезности; для немецких представителей описательных наук типично именно то, что они в своих описаниях останавливаются лишь там, где им ставят предел современные технические методы. В этой особенности немцев есть что-то очень глу-

бокое, и если подчас немного смешно, что “гора родит мышь”, то обыкновенно такая мышь является уже неотразимой. <...>

Часто за последние месяцы повторялось, что германская наука состоит главным образом из позаимствований, что немцы собирают отовсюду чужие идеи и разрабатывают их дальше. По отношению к некоторым направлениям науки это, по-видимому, действительно так, но по отношению к другим — это может быть сказано и про Англию, Россию, Америку и т.д. В конце концов это применимо и к Франции и значит только то, что в эволюции науки мы наблюдаем постоянное перекрестное оплодотворение. Если даже допустить, что Германия порождает меньше научных идей, чем Франция или Англия, — хотя это и сомнительно, — то не приходится уменьшать заслуги исследователей, которые открывают задатки в покающихся семенах и выращивают из них растение. Тому, кто утверждает, что Герц, например, опирается на Фицджеральда, можно ответить, что и Бэтсон вышел из Менделя; оба эти утверждения, однако, в равной степени до смешного далеки от истины. Утверждают, что фундамент теории электричества заложен в Англии; но разве не было бы законным, с другой стороны, признать, что Германия — родина клеточной теории? Если нас спросят, неужели мы отважимся сравнивать немецких геологов с геологами Англии и Шотландии, то мы подождем, пока наш торжествующий заранее собеседник откроет, что Зюсс хотя и родился в Лондоне, но большую часть жизни провел в Австрии и родиной своей сам считает Саксонию. <...>

Когда мы думаем о людях вроде Зюсса или Гельмгольца, Гёте или Йог.Мюллера — я называю лишь немногие выдающиеся имена, — мы ясно понимаем неправильность того утверждения, что высший титул гения неприменим к немецким ученым. Ясно, что каждая из руководящих цивилизованных наций имеет собственные области научных исследований первостепенной важности; но нет достаточных доказательств в пользу того взгляда, что одной какой-либо национальности принадлежит особая плодотворность научных исследований. Переходя от ученых выдающихся способностей к настоящим гениям, мы видим, что великие светочи мира представляют как бы индивидуальные мутации. В своем тончайшем выражении дух исследования отличается удивительной легкостью, свежестью, смелостью и проникновенностью, врожденным, а не выработанным мозговым потенциалом. Огонек, отмечающий появление этого Духа, блуждает с места на место, от одной национальности к другой, от расы к расе, из университета в университет, показываясь то в Пизе, то в Париже, перебрасывается отсюда в Лондон и в Лейден, в Брюссель и в Берлин, и далее в Эдинбург и Петроград, в Амстердам и Нью-Йорк. Это редкий великий Дух, священный и мо-

гущественный Дух, который дышит, где хочет; и никто не в состоянии сказать, откуда он приходит и куда уйдет».

Одну особенность немецкой науки выставляют на первый план англичане: ее планомерную организацию. Ученые и парламентские деятели в один голос настаивают на том, что в этом отношении Англия должна последовать примеру Германии и немедленно ввести у себя организацию науки. Правительственные круги, парламент особенно болезненно реагировали на то обстоятельство, что после начала войны обнаружилась отсталость Англии по многим техническим производствам. Как и у нас, в Англии заговорили о недостатке химических продуктов, в особенности красок, нужных для текстильного производства; не хватало фармацевтических препаратов, огнеупорного фарфора, стекла для оптических инструментов и т.д. Изготовление всех этих продуктов в Англии оказалось затруднительным не вследствие недостатка капиталов или сырых материалов, машин, а главным образом, вследствие отсутствия необходимого числа хорошо подготовленных специалистов-химиков. Министр народного просвещения (President of the Board of Education) Пиз привел следующую справку: на службе на четырех только немецких фабриках состоит 1000 химиков, между тем как во всей английской индустрии занято не более 1500 химиков; в Германии в настоящее время изучают химию 3000 студентов, а в Англии только 350! Министр предложил палате немедленно организовать Вспомогательный Совет промышленных изысканий (Advisory Council of Industrial Research). В качестве членов этого Совета должны быть привлечены лучшие ученые Англии, так как «великая задача, возлагаемая на них, имеет самое жизненное значение для страны». Совет сам определит, какие средства ему потребуются для выполнения этой задачи, и министр лишь предварительно спрашивал на ближайшее время 25 000 ф. ст., разъясняя, что эта сумма должна быть вскоре во много раз увеличена. Одной из непосредственных задач Совета будет привлечение большого числа молодых ученых, которым должно быть обеспечено солидное вознаграждение. Громадным недостатком в организации английской науки до сих пор министр признает именно недостаточную оплату труда молодых ученых — лаборантов, ассистентов, которые на правительственной службе получали только 100 ф. ст. в год, между тем как немецкие химики и техники, окончив высшую школу, без труда находили применение своим знаниям в промышленности при гораздо более высокой оплате и при лучших перспективах на будущее.

Тесная связь с промышленностью является действительно самым важным преимуществом германской науки. По В.Рамсаю, есть три отличительные особенности немецкой промышленности

от английской. Во-первых, во главе немецких химических заводов стоят почти всюду ученые специалисты, и на каждые 15 рабочих приходится один ученый техник, а на каждые 45 — химик с высшим образованием. Во-вторых, весь этот ученый персонал работает научно и, изучая успехи науки во всех странах света, постоянно задается вопросом: «Нельзя ли применить новые приобретения науки к нашей промышленности?»³ Наконец, в-третьих, в Германии лучше, чем в других странах, поставлены пропаганда и распространение товаров, чем обеспечивается сбыт и рост немецкой индустрии и вместе с тем рост связанной с нею немецкой науки.

Легко понять, что немецкая промышленность играет организующую роль в таких научных областях, как химия, те или иные области физики, механики и т.д. Ясна также связь между промышленным капиталом и медициной — не только в области фармации, а также в области курортного и санитарного дела, отменная организация которого, привлекая тысячи больных из всех стран, дает средства к существованию сотням и тысячам врачей. Но можно ли говорить об организующей роли промышленности в деле развития чисто отвлеченных наук, как биология, теоретическая физика и химия, математика?

С первого взгляда может показаться, что связь между этими науками и промышленностью очень отдаленная. Ни теория относительности, ни экспериментальная эмбриология немецкой промышленности как будто и не нужны. Правда, потребности промышленности увеличивают во много раз контингент лиц, приступающих к изучению химии, физики и медицины, и среди такого увеличенного контингента, конечно, найдется больше молодых ученых, способности и вкусы которых лежат на стороне теоретической науки. Но все-таки организация этих наук такова же, как в других странах. Лаборатории университетов и высших технических школ то обширны и роскошно обставлены, то бедны, тесны, ютятся в старых, запущенных, совершенно непригодных зданиях. И никак нельзя сказать, чтобы производительность лабораторий всегда стояла в прямой зависимости от ее благоустройства: иногда получаем картину, чуть не обратную. Материальное положение профессоров и академической молодежи далеко не блестяще¹. Человеку, лишенному личных средств, почти невозможно избрать академическую карьеру. Но связь с высшею школой — звание ассистента, приват-доцента, а особенно профессора, хотя бы и нештатного, — пользуется таким уважением в глазах всякого немца, что всегда обеспечен достаточный приток к академической карьере из среды состоятельной и средней буржуазии, к ко-

торой и относится большинство немецких академиков. Постановка преподавания в разных немецких лабораториях, конечно, различна, но во многих выучка, ознакомление с техникой науки поставлены на большую высоту. Юноша со средними способностями и достаточной усидчивостью в течение немногих лет под деятельным руководством профессора, готовится к своей первой научной работе, и если у него имеются желание и материальные средства для продолжения научных занятий, без особых затруднений привыкает каждый год или через небольшие промежутки времени выпускать по работе, может быть, и не очень высокого значения, но тем не менее входящей в состав научной литературы по данному специальному вопросу. Обилие таких посредственных ученых, очень полезных для выполнения научных задач второстепенного значения, весьма характерно для Германии. На фоне их особенно эффектно выделяются немногие, как и во всех странах, научные светила первой величины.

Англичане склонны преувеличивать значение германского государства в деле национальной организации науки. В одной из статей «Nature» высказывается мнение, будто в Германии, в противоположность Англии, легко добиться учреждения новой университетской кафедры: для этого надо только «обратиться к правительству». Насколько такое мнение далеко от действительности, видно хотя бы из следующего факта. Экспериментальная эмбриология как наука зародилась главным образом в Германии. Десятки немецких ученых печатают ежегодно новые исследования в этой области. Один из основателей этой науки, профессор В. Ру, в течение двадцати лет выпускает ежегодно по нескольку томов «Archiv für Entwicklungsmechanik». В течение ряда лет он ведет усиленную агитацию за учреждение особого института по экспериментальной эмбриологии (соответствует экспериментальной зоологии) или хотя бы университетской кафедры по этому предмету. Но до сих пор его авторитетная агитация, затрагивающая немецкое самолюбие, осталась тем не менее безрезультатной.

И все-таки мы сделали бы крупную ошибку, если бы заключили отсюда, что теоретическая наука в Германии в противоположность наукам, имеющим прикладное значение, страдает от недостатка национальной организации. Я хотел бы остановиться на одном в высшей степени важном содействии, которое теоретическая наука получает здесь опять-таки со стороны промышленного капитала. Я имею в виду капитал, вложенный в издательское книжное дело.

Передо мной весьма поучительная, роскошно изданная книга: «Jubilaums Katalog der Verlagsbuchhandlung Wilhelm Engelmann», Leipzig, 1811—1911, с горделивым девизом из Карлейля: «All that mankind has done, thought, gained or been;

¹ См. мою статью «Академическая молодежь» в «Русском богатстве». 1909.

it is lying as in magic perservation in the pages of books» — «Все, что человечество дало, измыслило, приобрело, все, чем оно было, лежит в чудесной сохранности на страницах книг».

Столетняя история издательства Энгельмана есть в значительной степени история немецкой науки, а с половины прошлого столетия — немецкого естествознания по преимуществу. В дело вложены громадные капиталы, и рост его, выраженный в цифрах, поразителен. В течение столетия фирма напечатала свыше 84 миллионов листов почти исключительно научного материала. Если бы эту бумагу разложить полосой шириною в $\frac{1}{2}$ метра, то полоса эта $1\frac{1}{2}$ раза обернулась бы вокруг земного экватора. В 1812 г. было отпечатано 3 000 экз. книг в 40 000 печатных листов, а в 1910 — 282 631 экз. в 2 767 107 печатных листов. Перечень всех книг, изданных фирмой, занимает 400 страниц большого формата. И какие же важные драгоценные издания по естествознанию имеются в этом перечне! Прежде всего ряд научных журналов, часто богато иллюстрированных, выходящих уже десятки лет. <...> Просматривая списки изданий отдельных авторов, мы убеждаемся, что благодаря Энгельману увидели свет произведения первоклассных немецких ученых. <...> Таким образом, немецкий ученый, достигший некоторой известности, вправе рассчитывать, что частный издатель на издание его произведений затратит сотню тысяч рублей. Этим беглым указанием достаточно, чтобы убедиться в том, что издательская фирма Энгельмана оказала не меньшее влияние на развитие теоретической науки в Германии, чем самая крупная из немецких химических фабрик на развитие химии. А наряду с этой издательской фирмой стоит целый ряд других, избравших себе ту же специальность: Фишер, Фридлэндер, Барт, Хагер, Штейнкопф, Бергман, Борнтрэгер и т.д. Некоторые из этих фирм издают еще больше книг по естествознанию ежегодно, чем фирма В.Энгельмана.

Громадные капиталы, вложенные в издательское дело, играют чрезвычайно важную роль в деле организации немецкой науки. Эту роль нельзя оценить слишком высоко, так как не подлежит сомнению, что без содействия издательского капитала германская наука не могла бы достигнуть теперешней высоты и не пользовалась бы таким влиянием на мировую науку. Ведь для того чтобы внести свой вклад в мировую сокровищницу знания, недостаточно еще открыть истину в тиши лаборатории и рассказать о ней своим ученикам и слушателям. Порою недостаточно даже ее опубликовать: ведь и напечатанные работы могут остаться непонятыми, незамеченными современниками, и на них обратят внимание только тогда, когда открытие будет сделано вновь и вполне самостоятельно другими. При той национальной организации науки, которую мы находим в Германии, науч-

ные исследования уже не пропадают: они печатаются в солидных специальных журналах, которые приобретаются библиотеками, высшими школами и лабораториями всего мира. Мало того: в Германии по каждой специальности издаются особые Указатели (*Zentralblätter* и *Anzeiger*), выходящие раз или два раза в месяц, и ежегодные Отчеты (*Berichte*), в которых приводятся краткие изложения всех опубликованных научных исследований по каждому вопросу. Абсолютно полными эти указатели, конечно, не бывают; справки о работах на русском языке, например, сюда по большей части совсем не попадают. Но ни одной немецкой работы в таком справочнике немцы, конечно, не пропустят, и потому ученым гораздо легче быть в курсе немецкой научной литературы, чем какой-либо другой. Громадное значение для пропаганды немецкой науки имеют также издания, в которых печатаются обзоры по специальным вопросам естествознания (*Ergebnisse*) и обширные многотомные руководства (*Handbücher*). Без этих изданий было бы чрезвычайно трудно разобраться в литературе сложных научных вопросов, и ученые всех стран пользуются трудолюбием немцев, собирающих для них с чрезвычайной тщательностью и обстоятельностью мировую литературу. Нередко случается, что подобные обзоры только проходят через редакции настоящих ученых, а вся кропотливая работа писания выпадает на долю их трудолюбивых учеников, ассистентов и даже студентов, остающихся безымянными. Но труды этих скромных работников идут на великую пользу немецкой науки, так как, конечно, нельзя требовать, чтобы авторы относились с одинаковым вниманием к открытиям и идеям немецких и иных ученых. Даже без предвзятого намерения каждый такой обзор является возвеличением, пропагандой немецкой науки¹.

В изданиях, оплачиваемых германскими капиталистами, работают все германские ученые, и для многих из них получаемый за эту работу гонорар имеет немалое значение. Но капиталисты совсем не меценатствуют, а очевидно получают на свой капитал хорошую прибыль, так как их издержки с большою прибылью покрываются сбытом, особенно в чужих странах. Идеи немецких ученых распространяются по всему свету, и в смысле пропаганды поставлены гораздо лучше, чем идеи французов и др. Лекторы во всех странах составляют свои курсы на основании преимущественно немецких изданий, студенты, приступая к первой работе, попадают прежде всего под влияние не-

¹ Помещенная в «La Revue» 1915 г. статья французского химика Ахальма является прямо обвинительным актом против немецких ученых библиографов. Так, разбирая учебники по физической химии, составленные Оствальдом и Нернстом, автор называет отношение этих авторов к работам чужеземных химиков, начиная с Лавуазье, прямо нечестными.

мецких ученых, составителей обзоров и руководств. В этой удивительной организации, может быть, главная сила немецкой науки.

II

С некоторою робостью от превосходно организованной немецкой науки переходим к положению науки русской!

<...> Только теперь стала нам вполне ясной гениальность нашего первого русского ученого — Ломоносова. Из глубоких недр коренного русского народа вышел этот всеобъемлющий ум. <...> Только теперь, читая его творения, понимаешь, насколько опередил свой век этот, по выражению Вальдена, «отец физической химии», задолго до Лавуазье предвосхитив закон сохранения материи или развивая изумительно близкие к нашим взгляды на значение ископаемых животных. Но наш восторг перед мощностью родного нам гения омрачается грустным сознанием той трагедии, которую пришлось пережить ему и его учению. Ломоносов жил и умер непонятым, он работал в пустыне, и его великие открытия прошли незамеченными, не оставив заметного следа в истории человеческого знания. Причина этой трагедии ясна: полное отсутствие в век Ломоносова организованной русской науки.

Горделивые слова о русских Платонах и Невтонах я слышал в торжественной речи, которою К.А.Тимирязев открыл первое общее собрание съезда естествоиспытателей и врачей в 1893 г. Это была чудесная вдохновенная речь. Большой зал Благородного собрания был переполнен членами съезда. «Праздником русской науки» назвал этот день Тимирязев; и когда с горделивым возгласом: «Иль мало нас?» он окинул взором свою громадную аудиторию, то все три тысячи присутствовавших членов съезда прониклись действительно радостным праздничным чувством.

Да, нас много! Русские цифры всегда внушительны. Россия — единственная страна в мире, в которой два университета имеют по 10 000 студентов и две высших женских школы свыше 7 000 студенток каждая. Уже давно русских естествоиспытателей и врачей, собирающихся на съезд, ни одна зала не в состоянии вместить в одном общем собрании.

Конечно, ни число русских студентов, ни тем более постоянно растущее громадное число членов естественно-исторических съездов не дают правильной оценки высот современного развития естествознания в России. Однако и другой важный вопрос о качестве разрешается в благоприятном для русской науки смысле. Правда, было бы слишком самонадеянно с нашей стороны попытаться прибавить четвертую, русскую, графу к той таблице с английским, французским и немецким столбцами, которую предложил А.Томсон. Но во введении к этой таблице автор сам склоняется

к тому выводу, что четвертое место принадлежит действительно России, и перечисляет ряд русских научных светил первой величины. Перечисляя русских ученых 19-го столетия, А.Томсон говорит, что Россия выставила К.М.Бэра, «одного из немногих величайших мыслителей, посвятившего свою жизнь биологии; Ковалевского, открывшего родственные связи асцидий; Мечникова с его имеющей самое широкое значение теорией фагоцитоза и воспаления; Менделеева, создавшего периодический закон; математического гения Лобачевского, физиолога Павлова и много других исследователей совершенно исключительного блеска».

В книге английского историка химии Хильдича (A Concise History of Chemistry, 1911) предлагается список 123 «типичных», по выражению автора, химиков. Вальден распределил этих химиков по странам. Оказалось, что на долю Германии приходится 38.20% всего числа, на долю Франции — 23.8%, Англии — 20.33%, а Россия занимает четвертое место со своими девятью химиками (7.32% — Зинин, Бутлеров, Зайцев, Бишоф, Менделеев, Меншуткин, Оствальд, Вальден, Чугаев; из представителей польской национальности — Кюри-Склодовская); следующее место принадлежит Швеции—Норвегии с 4 химиками, Италии и Голландии (каждая с 3 химиками) и, наконец, Дании с 2 химиками; ни Северная Америка, ни Австрия, ни Испания своих «типичных химиков», по Хильдичу, науке не дали.

Из списка, приведенного А.Томсоном, ясно, что в развитии биологии Россия приняла также крупное участие; не надо забывать, что одна из новейших отраслей этой науки — эмбриология — считается по преимуществу русской наукой.

Итак, не подлежит сомнению, что Российская земля может рождать и действительно рождает «быстрых разумом Невтонов». И если русская наука еще не может быть поставлена в один ряд с английской, французской и немецкой, то только потому, что она недостаточно организована.

На примере Германии мы познакомились с тремя способами организации науки; рассмотрим их по отношению к России.

Высшие школы в России, как и в Германии, — учреждения правительственные. В больших городах некоторые лаборатории и институты обставлены у нас с материальной стороны, пожалуй, не хуже, чем у немцев. Материальное положение, в особенности младшего преподавательского персонала, оставляет желать много лучшего; но ведь мы видели, что и у немцев здесь дело обстоит далеко не вполне благополучно. Однако никакими цифрами нельзя оценить громадную разницу в правовом положении немецкого и русского ученого. Там звание профессора считается едва ли не самым почетным званием, которого может добиться человек благодаря своим личным способностям, и даже скромный Herr Doctor пользуется

большим уважением окружающих. У нас ни профессура, ни звание приват-доцента или ассистента не защищают от самых грубых покушений со стороны всяческого начальства. Десятками лет путем медлительного, трудного процесса налаживается организация научных институтов и лабораторий; но ее умеют за какой-нибудь месяц разрушить наши Магницкие и Кассо. Улучшение правового положения профессуры — условие, совершенно необходимое для развития русской науки. Если это условие не будет выполнено, то никакие материальные подачки, ни устройство великолепных лабораторий не будут в состоянии поднять развитие русской науки.

Хочется верить, что переживаемая нами великая эпоха русской и мировой истории положит предел экспериментам подобного рода. Раны, нанесенные русской науке в недавнем прошлом, должны быть залечены решительными средствами. Должны быть возвращены к жизни Московский университет и Киевский политехникум. Эта мера положит начало новому периоду национальной организации русской науки.

* * *

В Германии химическая промышленность мобилизует громадные кадры ученых специалистов и тем способствует процветанию немецкой науки. Война показала с полной наглядностью недостатки промышленной организации у нас. Стремясь освободиться от тяжелой немецкой зависимости, русские промышленные круги готовы принести жертвы и затратить капиталы для развития химической промышленности у нас, в России. Но для такого развития необходимо достаточное число подготовленных химиков. Получается заколдованный круг: промышленность должна организовать науку, но для того, чтобы самой ступить на путь развития, она нуждается в ученых. Однако мы не должны опускать рук, так как перед таким же заколдованным кругом стоят и англичане. Они решили из него выйти и, конечно, выйдут. Нам следует взять с них пример и применить те меры, которые были приняты палатой общин. После обеспечения правового положения преподавательского персонала высших школ должны быть отпущены крупные средства для создания лабораторий и для научной подготовки молодежи сообразно с потребностями науки и промышленности.

Но в особенности важно не упустить момента и организовать дело научного издательства в России. Фарадей сказал, что есть три обязанности ученого: исследовать, доводить работу до конца и печатать. Но как трудно последнее для русского ученого: печатать на родном языке удается только случайно, и в смысле пропаганды научных идей такое опубликование является малоцелесообразным. У нас только представители физико-химических наук уже давно имели свой специальный ор-

ган — «Журнал Русского физико-химического общества». Биологи же печатают свои труды в изданиях университетов или ученых обществ, издания которых не имеют специального характера, и где исследование по эмбриологии затеривается между метеорологическими, геологическими или математическими статьями. Поэтому специалисты не выписывают подобных изданий и часто не в состоянии даже следить за ними, так как они попадают лишь в немногие библиотеки. В библиографических журналах отчеты об этих статьях помещаются с большим опозданием, и часто совершенно случайно наталкиваешься на интересную работу спустя год-другой после ее появления в свет. Во всяком случае русскому следить за русской научной литературой гораздо труднее, чем за иностранной. А для иностранных специалистов, не понимающих русского языка, работы, напечатанные по-русски, по большей части просто не существуют. И русский ученый, понимающий, что его обязанность не только заканчивать свои исследования, но и превращать их в идеи-силы, т.е. доводить их до сведения других специалистов, поневоле должен печатать работы на чужом, по большей части немецком, языке, в чужих — немецких — изданиях. Большинство из нас пишет на иностранных языках плохо, и наши иностранные статьи оказываются далеко не для всех доступными. Отделившись от русской национальной организации, они не могут примкнуть всецело и к чужой организации: им не хватает обыкновенно того активно-благоклонного сочувствия и полного доверия, которым встречаются работы своих.

Организация русского научного издательства — задача первостепенной важности для нашей эпохи. Ее осуществление уже началось. Еще до начала войны начал выходить в Петрограде под редакцией профессора Г.А.Надсона «Журнал микробиологии», задачи которого и содержание пяти первых выпусков разобраны в мартовской книжке «Природы» с.г. (с.482). С января текущего года под редакцией академика Н.И.Андрусова выходит «Геологический вестник», о котором также даны рецензии в «Природе» (май 1915 г., с.763).

Событием высокой важности окажется также появление обещанных к осени первых выпусков двух зоологических журналов: под редакцией профессора А.С.Догеля будет выходить «Русский архив научной микроскопии»; под редакцией профессоров В.М.Шимкевича и В.А.Догеля — «Зоологический вестник». Это будут ценные, снабженные большим количеством таблиц издания, которые, конечно, заменят для русских ученых те немецкие журналы, в которых мы имели обыкновение печатать свои работы до сих пор. <...> Совершенно очевидно, что материала у нас хватит на оба новых журнала.

Еще одно необходимое издание намечено в Петрограде: «Русский биологический журнал имени

И.М.Сеченова» при открывающемся в ближайшем времени по инициативе XII Пироговского съезда Общества российских биологов. В этом журнале будут сосредоточены статьи русских авторов по экспериментальной биологии, нормальной и патологической, до сих пор печатавшиеся преимущественно в «Archiv für Gesamte Physiologie».

Вряд ли можно сомневаться в том, что и журналы по другим специальным отраслям естествознания не заставят себя долго ждать.

Во всех уже возникших и только обещанных изданиях вопрос о языке решается довольно однообразно и правильно. Так как русского языка за границей еще не знают, то при статьях на русском языке будут даваться резюме, или даже полные переводы на одном из иностранных языков; «Русский биологический журнал имени И.М.Сеченова» допускает даже появление статей на иностранном языке с русским резюме. <...>

Перечисленные выше журналы содержат оригинальные исследования русских естествоиспытателей. Наряду с ними нам нужны будут другие журналы: ежегодные или ежемесячные справочники по разным отраслям науки. Конечно, и «Микробиологический журнал» и «Зоологический вестник» будут развивать свои библиографические отделы, но они не смогут отводить им достаточно места, чтобы обеспечить необходимую полноту. Программы специальных библиографических справочников могут быть различны в зависимости от различия их задач. Во-первых, их можно приспособить для обзора исключительно русской литературы. Мы уже имеем одно превосходное издание этого рода: «Ежегодник русской медицинской печати», издаваемый в Москве под главной редакцией профессора А.В.Мартынова, при участии крупных ученых сил. Вышло уже два тома этого издания; второй том, появившийся в 1914 г., содержит 1130 страниц и дает сводку литературы за 1912 г. — незначительное запоздание, допускаемое и в заграничных изданиях такого рода. Сводный обзор за 1913 и 1914 гг. появится в скором времени. Для многих работ здесь приводятся только заглавие, но большинство более или менее подробно реферировано; все рефераты — на русском языке. Каждый врач должен был бы считать себя нравственно обязанным приобретать этот сборник, чтобы следить за наукой и поддерживать это в высшей степени важное для развития русской медицины начинание. Русская литература по естественным наукам, конечно, не столь богата, как медицинская, и можно было бы, пожалуй, поставить задачей давать ежегодные сводки ее на иностранном языке для пропаганды среди ученых, не знающих русского языка. Но ввиду того, что русские работы в большинстве случаев снабжаются резюме на иностранном языке, такая задача была бы не очень существенной, и более важной была бы, по моему мнению, другая: давать на русском языке справочники не только по

русской, но и по иностранной литературе. Эти справочники приблизят науку к начинающим русским ученым и студентам, которым из-за недостаточного знания языка нередко трудно следить за научной литературой по немецким справочникам. С другой стороны, заботясь о полноте русской научной литературы, русские справочники закрепляли бы у читателей более внимательное отношение к успехам русской науки, о которых дают лишь слабое представление справочники иностранные. В настоящее время уже начаты переговоры об издании в Москве периодического справочника по физике и физической химии и по экспериментальной биологии; возможно, что удастся сосредоточить в Москве и ряд других справочников, подобно тому как русские издания для опубликования оригинальных работ сосредоточиваются в Петрограде.

На первое время в задачу справочников придется, вероятно, включить и обзоры по специальным научным вопросам, хотя в иностранной и особенно немецкой литературе, как это указано выше, обзорам посвящаются особые издания; их задача не только собирать литературу, но и приводить ее в систему, и здесь национальность автора обзора сказывается в особенности сильно при распределении заслуг между отдельными учеными, работавшими по данному вопросу. До сих пор обзорный характер у нас носили только энциклопедические словари и такие научно-популярные издания, как «Итоги науки» и наша «Природа». Из специальных обзорных изданий на русском языке я могу указать на «Медицинскую микробиологию», вышедшую в издании «Сотрудника» под редакцией Л.А.Тарасевича. Успех этого интересного издания, все статьи которого написаны русскими учеными, должен был бы вызвать подражание у издателей; хотелось бы видеть на русском языке если не особые обзорные журналы этого рода, то хотя бы отдельные руководства, посвященные тем или иным отраслям естествознания.

Наконец, нам в России нужны издания, соответствующие французским Comptes Rendues или немецким Anzeiger, в которых немедленно по доставлении в редакции печатаются краткие заметки о только что полученных результатах научных исследований и предварительные сообщения о работах, подробное изложение которых не может быть скоро опубликовано. Такой характер придала своему журналу Петроградская биологическая лаборатория имени Лесгафта, в последнем выпуске «Известий» которой на 98 страницах помещено 23 статьи — все оригинальные, о собственных еще нигде не опубликованных исследованиях авторов. Статьи — на русском языке; их французские переводы печатаются в «Comptes rendues de la Société de Biologie» в Париже (см. заметку в «Природе»).

Все эти новые издания, из которых некоторые уже вышли в свет, другие объявлены, а третьи

только намечаются, не повредят своей конкуренцией тем изданиям академий, ученых обществ и высших школ, которые существуют в настоящее время. Ведь большая часть работ, печатаемых в настоящее время в изданиях этих учреждений, как все работы по фаунистике и флористике, по областной геологии и географии, останутся и впредь при старом способе опубликования. И необходимый рост научного изучения разных областей России вызовет дальнейший рост соответствующих областных изданий, если даже те или иные работы по морфологии, по физике или палеонтологии отойдут в соответствующие специальные журналы. При правильной организации научной литературы все статьи о Кавказе должны быть сосредоточены в кавказских изданиях, и статью о жуках Тульской губернии всего легче отыскать в «Записках Тульского общества». Если какая-либо лаборатория, отличающаяся по специальности от других, пожелает закрепить свое специальное направление в серии из нескольких выпусков или томов, то организация русской науки при наличии соответствующих периодических справочников несколько не пострадает. А с другой стороны, диссертации, печатаемые в настоящее время в «Записках» различных университетов, вместо того, чтобы быть погребенными в общей могиле с протоколами и отчетами, перейдут в специальные журналы.

Для согласования общего плана новых научных изданий и для избежания излишних трений и в высшей степени нежелательной в первое время конкуренции и разбрасывания сил, было бы весьма желательно провести программу организации русской науки через очередной или специально для этой цели собранный съезд русских естествоиспытателей и врачей. Великая национальная задача, стоящая перед нами, выполнима лишь при единодушном сочувствии со стороны всех русских ученых. Настало время объединиться на этой далекой от узкого шовинизма задаче: поднять научную производительность нашей богатой природными силами страны и тем способствовать

процветанию мировой науки. Не надо забывать, что сложная финансовая сторона дела требует особенного внимания и энергичной поддержки со стороны всего русского общества. До сих пор научные издания у нас часто рано гибли от недостатка материальных средств; это было причиной последовательной гибели ряда предшественников нашей «Природы»; от этой же причины погиб недавно, просуществовав только два года, интересный московский «Биологический журнал». Совершенно непозволительно то равнодушие, с которым относились до сих пор к русским научным изданиям даже такие просветительные учреждения, как университеты и высшие школы: состоящие при них библиотеки привыкли получать даром все русские издания, и из крупных бюджетных сумм, уходящих на оплату главным образом заграничных изданий, они не решаются порою потратить несколько рублей на поддержку русского научного журнала, издаваемого на частные средства. Конечно, этой плохой политике должен теперь быть положен конец: все просветительные учреждения должны поставить на первый план правильную поддержку организованной русской научной издательской деятельности. Наши съезды естествоиспытателей и врачей собирают каждый раз тысячи членов; пусть всякий участник съезда, всякий, кто интересуется процветанием русской науки, помнит, что на его обязанности лежит поддерживать материально русскую науку. Нет, вероятно, немца, окончившего университет, который не выписывал бы себе того или иного издания по своей специальности; русская научная литература может развиваться у нас только тогда, если мы последуем в этом отношении примеру немцев.

Дорого стоит нам полная ужаса война, уносит жизни наших братьев, уносит народные средства. Только одно может искупить эти великие потери: подъем русской культуры по окончании войны. Вот почему теперь более, чем когда-либо, мы должны считать национальную организацию русской науки делом самой высокой важности.

Новости науки

Астрофизика

Еще один класс вспышек сверхновых?

В настоящее время считается, что вспышки сверхновых происходят в результате действия двух кардинально различных механизмов — термоядерного взрыва на белом карлике (обычные сверхновые типа Ia) и коллапса железного ядра проэволюционировавшей массивной звезды (сверхновые типов Ib/c и II). Необычная сверхновая, обнаруженная Д.Познански (D.Poznanski; Калифорнийский университет, США) и его коллегами при повторном анализе данных семилетней давности, может оказаться первым представителем нового, третьего, типа вспышек, которые происходят в двойных системах типа AM Гончих Псов.

Сверхновая SN 2002bj в галактике NGC 1821 из созвездия Зайца была замечена в 2002 г. при использовании телескопа КАИТ (Katzman Automatic Imaging Telescope — автоматический панорамный телескоп Кацмана), принадлежащего Ликской обсерватории (США). Этот телескоп применяется для автоматического поиска сверхновых — с его помощью таких объектов открыто уже около 800. К сожалению, изначально вспышка SN 2002bj была ошибочно классифицирована как обычная сверхновая второго типа и не привлекла ничего внимания. Однако в июне 2008 г. Познански снова вернулся к ее спектру, занимаясь поиском сверхновых, которые надеялся использовать в качестве индикаторов расстояния до очень далеких объектов. Тщательно изучив спектр сверхновой SN 2002bj, он обнаружил, что эта вспышка относится

вовсе не к типу II, а скорее к необычному виду сверхновых, более близкому к типу Ia.

Прежде всего, в спектре вспышки не оказалось линий водорода. Их отсутствие — главный отличительный признак сверхновых типа Ia. С другой стороны, в спектре наблюдались линии гелия, углерода, серы и ванадия, которые для сверхновых Ia нетипичны, в то же время не было линий элементов железного пика, хотя эти взрывы считаются основными поставщиками железа в Галактике. Как выяснилось, скорость расширения оболочки меньше тех значений, которые типичны для «нормальных» взрывов, да и вся энергетика вспышки «не дотянула» примерно на порядок величины до обычной для сверхновой типа Ia.

Но главным отличительным признаком SN 2002bj оказалось стремительное убывание ее яркости: звезда практически исчезла через 20 дней после обнаружения, тогда как большинство сверхновых после вспышки наблюдаются еще 3—4 месяца. Подняв из архива тысячи спектров сверхновых, авторы так и не смогли найти объект с таким же химическим составом и с такой же кривой блеска. Конечно, внутри двух основных механизмов вспышек сверхновых есть большой разброс параметров, но он не безграничен, и объект SN 2002bj выходит за эти рамки.

Между тем существование подобных вспышек было предсказано еще в 2007 г.: Л.Билдстен (L.Bildsten; Калифорнийский университет в Санта-Барбаре, США) и его соавторы предположили, что именно такие быстрые и неяркие (относительно других сверхновых) вспышки должны

происходить в двойных звездах типа AM CVn (AM Гончих Псов). В таких системах один из компонентов (гелиевый белый карлик или гелиевая звезда) теряет вещество, которое перетекает на второй компаньон (белый карлик) под воздействием его гравитации. Когда на поверхности белого карлика скапливается достаточно много гелия, происходит взрыв, напоминающий слабую и быструю термоядерную сверхновую. При этом, в отличие от «нормальной» вспышки типа Ia, у белого карлика взрывается гелиевая оболочка. Иначе говоря, речь по сути идет не о вспышке сверхновой, а о чрезвычайно мощной вспышке новой звезды, которая в тысячу раз мощнее стандартной новой. В результате таких вспышек синтезируются тяжелые элементы, например хром ^{51}Cr (период полураспада 27.7 сут), который затем распадается до ванадия и титана, поэтому линии ванадия в спектре подобного объекта вполне ожидаемы.

В целом, отмечают авторы работы, за последние несколько лет наши познания о сверхновых существенно расширились, включив информацию об интересных их новых подклассах и даже новых физических классах. И это только начало — вновь разработанные проекты, подобные таким, как Паломарская фабрика транзиентов (Palomar Transient Factory), Обзор темной энергии (Dark Energy Survey) и Большой синоптический обзорный телескоп (Large Synoptic Survey Telescope), позволят открывать сверхновые не сотнями, а тысячами и десятками тысяч. При этом, естественно, в поле зрения могут оказаться новые редкие и необычные объекты.

Science. 2010. V.327. №5961. P.58 (США).

Астрономия

Новая космическая линейка

Определение расстояний — одна из самых насущных астрономических задач. К сожалению, наши возможности по их измерению ограничены лишь ближайшими окрестностями Солнца, примерно сотней парсек. Именно на таких расстояниях действует геометрическая космическая линейка — метод годичных параллаксов. Он позволяет определять разность направлений на звезду из двух противоположных положений Земли на орбите, а расстояние до светила получают из решения треугольника. Во всех остальных случаях приходится полагаться на косвенные методы, среди которых одно из ведущих мест занимает определение расстояний по цефеидам — переменным звездам с периодами в несколько дней. Уже давно известно, что истинные яркости цефеид пропорциональны их периодам, поэтому можно из наблюдений установить период цефеиды, рассчитать по нему ее истинную яркость и, сравнив с яркостью наблюдаемой, вычислить расстояние. К сожалению, этот метод тоже ограничен: расстояния, которые можно измерить с его помощью, не превышают 20—30 Мпк.

Ученые из Университета штата Огайо¹ полагают, что им удалось продлить цефеидную линейку в три раза, до сотни мегапарсек, за счет использования цефеид редкого типа, обладающих сверхдлинными периодами — более 80 сут. Таких звезд известно очень немного. Авторам работы удалось найти сведения всего о 18 объектах, что неудивительно: чем длиннее период звезды, тем сложнее обнаружить ее переменность. Не слишком большой интерес к этим звездам вызван еще и тем, что для них связь период—светимость становится более плоской, т.е. с удлинением периода светимость перестает от

¹ Stanek K. // *Astrophys. J.* 2009. V.695. №2. P.874—882.

него зависеть. Это означает, что цефеидный метод определения расстояний в классическом варианте к таким звездам неприменим. Однако К.Станек с коллегами обращают внимание на то, что благодаря неизменной светимости цефеиды становятся классическими «стандартными свечами»! И следовательно, могут применяться для измерения расстояний вообще без информации о периоде (хотя он все равно нужен, чтобы была возможность отнести звезду к классу цефеид).

Все известные долгопериодические цефеиды расположены в близких галактиках с хорошо известными расстояниями, поэтому для этих звезд легко решается проблема ноль-пункта, т.е. проблема привязки к существующим шкалам. Правда, относительная точность определения расстояний пока невысока, однако авторы связывают это с небольшим количеством объектов, доступных для анализа, и считают, что по мере появления информации о новых долгопериодических цефеидах ее удастся довести до 10—20%, что сравнимо с другими методами. При этом долгопериодические цефеиды будут видны на значительно больших расстояниях, чем классические.

Еще один интересный аспект исследования этих объектов связан с теорией эволюции массивных звезд. Все известные долгопериодические цефеиды массивны: их масса превышает солнечную в 12—20 раз. Эволюционные модели предсказывают, что условия для появления пульсаций возникают на таких звездах лишь однажды, при переходе с главной последовательности в область красных гигантов. При этом период пульсаций постепенно возрастает. Однако у одной из звезд, исследованных Станеком и его коллегами, — HV829 из Малого Магелланова Облака — период убывает: 40 лет назад ее блеск менялся с периодом 87.6 сут, теперь же он сократился до 84.4 сут. Это означает, что звезда постепенно становится компактнее и горячее, что соответствует движению по диаграмме

Герцшпрунга—Рассела в обратном направлении. Столь неожиданный факт, считают авторы, указывает на важность изучения долгопериодических цефеид с позиции уточнения теории эволюции массивных звезд. К тому же в качестве бонуса мы получаем еще и возможность использовать их как «стандартные свечи».

© Д.З.Вибе,
доктор физико-математических наук
Москва

Физика

Магнитные поверхности

Поверхности материалов привлекают внимание исследователей разнообразием своих свойств, функциональностью и возможностью наблюдать на них уникальные эффекты. Недавно получены новые результаты при нанесении магнитных атомов и молекул на поверхность металлов.

Многонациональному коллективу ученых из восьми стран (Германии, Индии, Испании, Нидерландов, США, Франции, Швейцарии, Швеции)² удалось сформировать на поверхности меди упорядоченную супрамолекулярную сетку из органических молекул с атомами Fe. При этом они показали, что направление оси легкого намагничивания (параллельно или перпендикулярно слоям) можно контролировать просто путем адсорбции молекул кислорода.

Итало-французская группа³ изготовила монослой из одномолекулярных магнитов Fe₄, закрепленных (опять же с помощью органики) на поверхности золота. Эти наномангниты демонстрируют гистерезис, что в принципе позволяет использовать их в устройствах магнитной памяти. В пределах каждой молекулы Fe₄ спины атомов Fe упорядочены за счет обменного взаимодействия. Общие для этих работ заключается в том, что они демонстрируют принципиальную

² Gambardella P. et al. // *Nature Mater.* 2009. V.3. P.189—193.

³ Mannini M. et al. // *Nature Mater.* 2009. V.3. P.194—197.

возможность избежать размагничивающего влияния подложки на поверхностный магнитный слой. И хотя эксперименты проводились пока при субкельвинных температурах, главное — начать!

<http://perst.issp.ras.ru> (2009. Т.16. Вып.6).

Химия

Платиновые нанокатализаторы

Известно, что химическая активность атомных кластеров существенно выше, чем у более крупных частиц из того же материала. Объясняется это тем, что в таких кластерах практически все атомы «поверхностные», т.е. характеризуются малыми координационными числами, а значит — имеют ненасыщенные связи, которые и участвуют в катализе.

В работе американско-германской группы исследователей показано, что при окислительной дегидрогенизации пропана каталитическая способность кластеров Pt_n с $n = 8-10$ не только в 40–100 раз выше, чем у известных аналогов, но к тому же избирательна: в результате реакции с их участием образуется пропилен, а не какие-то побочные продукты¹. Экспериментаторам удалось осадить кластеры Pt_n на подложку, покрытую тонкой пленкой Al₂O₃, таким образом, что они не слиплись друг с другом, а сохранили свою «кластерную сущность».

Селекцию кластеров по числу атомов в них осуществляли с использованием квадрупольного масс-спектрометра. Сканирующая туннельная микроскопия подтвердила, что все осажденные кластеры имеют одинаковые размеры и остаются устойчивыми при $T < 400^\circ\text{C}$. Каталитическая реакция проходила при $T = 500^\circ\text{C}$. Расчеты из первых принципов показали, что кластеры Pt₈ «вытягивают» электроны из пленки Al₂O₃ и становятся отрицательно заряженными. Возможно, именно в этом и заключается причина их высокой каталитической активности: энергетический барьер

¹ Vajda S. et al. // Nature Mater. 2009. V.3. P.213–216.

для разрыва первой связи C–H в пропане уменьшается.

Предложенная технология изготовления кластерных нанокатализаторов может быть использована в промышленном производстве.

<http://perst.issp.ras.ru> (2009. Т.16. Вып.6).

Химия

Новая технология массового производства графена

Германо-американская группа исследователей во главе с К.В.Емцевым² предложила новую технологию массового производства графена — монослоя атомов углерода, обладающего целым рядом уникальных физических свойств и рассматривающегося в качестве одного из основных кандидатов в материалы наноэлектроники³. Эта технология основана на графитизации поверхности карбида кремния в атмосфере аргона. Все предыдущие попытки вырастить графен на SiC оказались неудачными по той простой причине, что необходимый для графитизации нагрев образца осуществляли в вакууме. Это приводило либо к разупорядочению поверхности при высокой температуре (из-за разложения SiC и испарения Si), либо к подавлению диффузии атомов углерода — при низкой. В результате слой графена получался не сплошным, а распадался на отдельные блоки с характерными размерами от 30 до 200 нм.

В данном случае образец нагревали в плотной атмосфере инертного газа: даже при давлении, близком к атмосферному, она препятствует сублимации Si при температурах, достаточных для формирования графена на поверхности. Карбид кремния — диэлектрик, поэтому не шунтирует текущий по графену электрический ток. Подвижность носителей в графене составила около 2 тыс. см²/(В·с) при $T = 27\text{ K}$ (что значительно выше, чем в лучших образцах графе-

² Emtsev K.V. et al. // Nature Mater. 2009. V.8. P.203–207.

³ См., напр.: Новый материал на основе графена // Природа. 2010. №3. С.82.

на-на-кремнии, полученных ранее другими методами). Так как способы изготовления пластин SiC большого диаметра хорошо отработаны, можно надеяться, что и с графеном проблем не будет.

<http://perst.issp.ras.ru> (2009. Т.16. Вып.5).

Зоология

Как жабы заселили мир

Ныне жабы, расселившись из Южной Америки — своей исторической прародины — обитают на всех континентах. Чем можно объяснить столь успешное распространение этих, казалось бы, медлительных, неуклюжих и уязвимых существ?

Ответить на этот вопрос сумела аспирантка Свободного университета Брюсселя И.Ван Бокслейер (I.Van Bocxlaer), подробно изучившая 228 видов жаб. Этой работе предшествовало другое ее исследование, проведенное совместно с коллегами: они построили родословное древо 86 видов жаб, сопоставив обнаруженные у них ядерные и митохондриальные генетические маркеры. В отличие от морфологических, такие молекулярные признаки нейтральны (не подвержены давлению отбора) и потому не могут возникать повторно в результате конвергентной эволюции.

Прежде систематики считали, что род *Bufo*, или истинных жаб, обладающих толстой бородавчатой кожей и короткими ногами, — это одна из ветвей их генеалогического древа и все эти признаки унаследованы от общего предка. Однако оказалось, что подобный облик возникал неоднократно, составляющие его признаки появлялись в ходе эволюции в разное время, в разной последовательности и на разных ветвях генеалогии жаб. Более того, когда исследователи посмотрели, как жабы с таким характерным обликом распределены географически и когда они, судя по палеонтологическим данным, впервые появились в том или ином месте, оказалось, что первыми заселяли новый континент или регион именно «типичные» жабы.

Исследователи заподозрили, что представители рода *Buffo* обладали определенным набором признаков, благоприятствовавших глобальной экспансии, и выделили семь из них. Одним, например, могла быть независимость от местообитаний с высокой влажностью или наличием временных водоемов; жабы, способные откладывать яйца в любой влажной среде, несомненно, получали преимущества в процессе расселения. К другим признакам были отнесены ядовитые кожные железы, отложения жира как источника энергии, большой размер тела, крупные кладки, состоящие из тысяч яиц, способность головастиков самостоятельно добывать пищу, а не полагаться на запасы питательных веществ, оставленные матерью.

Чтобы убедиться, что успешно расселившиеся жабы действительно обладают всеми этими признаками, исследователи добавили еще 142 вида к построенной родословной — теперь она включала 43% всех известных видов жаб. На основе доступных публикаций был составлен регистр ареалов для всех этих видов и прослежено, насколько тесно успех колонизации (площадь ареала) коррелирует с наличием выделенных признаков. Результат получился однозначным: жабы с типичной для них морфологией оказались идеально приспособленными к выживанию в наиболее разнообразных местообитаниях и, соответственно, к широчайшей экспансии. *Science*. 2010. V.327. №5966. P.633 (США).

Микробиология. Ботаника

Новый препарат для лечения малярии

На протяжении тысячелетий китайские травники использовали листья полыни однолетней (*Artemisia annua*) для лечения множества недугов, в том числе малярии. Ныне содержащееся в этом растении вещество артемизин применяется в качестве наиболее эффективного противомалярийного препарата, особенно после того как паразит приобрел

лекарственную устойчивость к хинину и его производным.

Мировая потребность в эффективном средстве против малярии огромна: ежегодно свыше 1 млн человек умирают от этой болезни и сотни миллионов заболевают. Природные источники сырья для производства артемизина совершенно недостаточны, чтобы удовлетворить потребности в препарате, к тому же дикорастущие виды артемизии очень сильно различаются по содержанию действующего вещества.

Попытки получать артемизин методами генной инженерии в дрожжевых и бактериальных системах пока наталкиваются, как и методы химического синтеза, на значительные трудности. Из тысяч испытанных на животных синтетических аналогов лишь несколько оказались потенциально пригодными и эффективными, но все равно слишком дорогими, к тому же их безопасность для человека остается невыясненной. В связи с этим была предложена другая стратегия производства препарата: выведение сортов полыни, отличающихся высоким содержанием действующего вещества и пригодных для промышленного выращивания.

Британские исследователи под руководством Я.Грэхэма (I.Graham; Йоркский университет, Великобритания), расшифровав геном полыни, выявили гены и связанные с ними маркеры, ответственные за синтез артемизина. Полученная информация позволит быстро вести поиск дикорастущих растений с наибольшим содержанием артемизина, а затем и их селекцию для выведения промышленных сортов, пригодных для получения лекарственного препарата.

Science. 2010. V.327. №5963. P.328–331 (США).

Морская геология

Освоение железомарганцевых руд океанского дна

В связи с планируемыми на 2015–2020 гг. перспективами до-

бычи железомарганцевых руд океана Е.С.Базилевская (Геологический институт РАН) рассмотрела некоторые проблемы их происхождения, скоростей образования и особенностей химического состава, особо подчеркивая, что формирование промышленно ценных руд на океанском дне происходит непрерывно на протяжении всей геологической истории существования Мирового океана.

Несмотря на то что скорость роста рудных конкреций и корок не превышает нескольких миллиметров в миллион лет, к настоящему времени эти образования стали уникальными концентраторами металлов. Эти руды не только включают стратегически важные микроэлементы и марганец, но и являются носителями огромных количеств легко мобилизуемого кислорода, который способен насыщать и пересыщать морскую воду при многочисленных эндогенных событиях на океанском дне.

Автор подчеркивает, что добыча железомарганцевых руд может производиться только на базе чистых технологий и под контролем компетентного международного органа.

Материалы XVIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Москва, 16–20 ноября 2009 г. Т. II. С.223 (Россия).

Геология

Ленточные глины на северо-востоке Алтая — признак погребенных россыпей золота

Находки озерных глин на территории горной страны всегда вызывают большой интерес у геологов и геоморфологов, особенно находки озерных глин ленточного типа. По мнению многих исследователей, такие глины имеют озеро-ледниковое происхождение.

В ходе полевых работ, проводившихся в 2007–2008 гг. на территории северо-восточного Алтая, А.Л.Будников (ОАО «Горно-Алтайская экспедиция») и А.Н.Рудой (Томский государственный уни-

верситет) нашли и обследовали несколько локальных участков, приуроченных к карстовым котловинам, в которых сохранились озерные ленточные глины. Впервые их обнажение найдено севернее Телецкого озера, в правом борту ручья Эскиз, впадающего в р.Башлам. Это один из наиболее сохранившихся разрезов ранее существовавшего здесь подпружного палеозера. Округлой формы (не более 0.5 км в диаметре), оно пространственно приурочено к кембрийским известнякам, среди которых фиксируются слабо выраженные в рельефе карстовые воронки. Их нижние части заполнены перелоточными продуктами мел-палеогеновых золотоносных кор выветривания, а те, в свою очередь, перекрыты более поздними озерными отложениями плейстоцен-голоценового возраста. Видимая мощность озерных отложений 18 м. Обрывки растений, отобранных с глубины 16 м от поверхности, дали радиоуглеродный возраст 6785 ± 140 лет.

Характерный признак ленточных глин — их горизонтальная слоистость по всему разрезу. Толща делится на ленты мощностью 3–4 см. Их верхний, более светлый, горизонт, не превышающий 1 см, вероятно, соответствует годичным циклам накопления осадков, а микрослойки (не более 1–2 мм), на которые делятся слои, соответствуют сезонным циклам осадконакопления. Сами глины мокрые, мягкопластичные, чистые, без примесей песчанистого и дресвянистого материала. В нижних горизонтах разреза параллельно слоистости лежат округлые, дискоидальной формы, конкреции диаметром до 1–2 см, сложенные лучистым агрегатом чистого кальцита с небольшой примесью (до 5%) тонкого пелитового материала — это так называемые иматровы камни. Их присутствие в отложениях и характер переслаивания ленточных глин указывают на холодный континентальный климат с резко выраженными сухими и теплыми сезонами. Судя по мощности отложений и количеству годичных прослоев, этому палеобассейну не ме-

нее 6 тыс. лет. Химический анализ здешних глин показал повышенное содержание в них кальция и пониженное — калия, что не характерно для большинства изученных на территории Горного Алтая глинистых отложений ленточного типа, имеющих озерно-ледниковое происхождение. Таким образом, отложения озерно-ледниковых и озерно-карстовых образований имеют различный химический состав: повышенное содержание кальция в ленточных глинах озерно-карстового типа — результат химического растворения известковых пород, переноса кальция водными растворами и последующей его аккумуляции в донных осадках.

Формирование озерных глин ленточного типа в озерно-карстовых котловинах продолжается и в настоящее время. Например, на левобережье р.Калычак находится замкнутое озеро округлой формы (20×25 м), приуроченное к карстовой воронке. Оно расположено среди кембрийских известняков, в которых отмечены карстовые пещеры, воронки и карстовые сифоны. Накопление осадков в этом водоеме происходит со скоростью 1–3 мм/год, что характерно для бассейнов с атмосферным питанием и изолированных от мутьевых потоков.

В поисковом плане, отмечают авторы, озерно-карстовые отложения ленточного типа на территории северо-восточного Алтая служат надежным диагностическим признаком для выявления так называемых «богатых карликов» — погребенных россыпей золота, приуроченных к карстовым воронкам.

VI Всероссийское совещание по изучению четвертичного периода. Новосибирск, 19–23 октября 2009 г. С.94–96 (Россия).

Океанология

Высвобождение метана из мерзлотных толщ арктического шельфа

Арктический регион, включая континентальный шельф и сушу, содержит огромное количество

углеводородов в неглубоких слоях осадочных пород. Большая часть углеродных соединений захоронена в многолетней мерзлоте. Высвобождение метана в атмосферу по мере таяния мерзлотных толщ рассматривается международной группой ученых как положительная обратная связь при потеплении климата. Наблюдаемое в начале XXI в. потепление в арктическом регионе опережает прогнозы на несколько градусов, а значит, может усилить потоки метана в атмосферу по механизму обратной связи. Большинство замеров эмиссии метана из оттаивающих пластов проводилось на суше, а на обширном, но малодоступном Восточно-Сибирском арктическом шельфе, где потепление выражено особенно четко, они пока что немногочисленны.

В новой работе этой группы исследователей под руководством Н.Е.Шаховой из Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН (Владивосток), Международного центра исследования Арктики (Университет штата Аляска, США) и Стокгольмского университета (Швеция) представлены результаты замеров концентрации метана в атмосфере, придонных и поверхностных водах Восточно-Сибирского арктического шельфа, проведенных в 2003–2008 гг.

Данный регион, включающий море Лаптевых, Восточно-Сибирское море и российскую часть Чукотского моря, занимает площадь $2.1 \cdot 10^6$ км², что втрое больше заболоченной территории Сибири. Это мелководное продолжение сибирской тундры было затоплено в период голоценовой трансгрессии (15–7 тыс. лет назад). Многолетнемерзлые донные толщи состоят здесь из чередующихся слоев морских осадков и погребенного болотного торфа. Они содержат запасы углерода, сравнимые с заключенными в многолетней мерзлоте сибирской тундры, а также донные отложения кристаллогидратов метана.

По мнению авторов, мерзлые толщи шельфа потенциально более уязвимы для оттаивания, чем материковая мерзлота. Среднего-

довая температура донных вод морей восточной Арктики составляет от -1.8 до 1°C , что на $12-17^{\circ}\text{C}$ выше среднегодовой температуры поверхности многолетней мерзлоты на суше. В результате совместного действия геотермального тепла снизу и конвективного притока тепла от морской воды сверху слой подводной мерзлоты местами разрушается, становясь проницаемым для газов. Поэтому авторы предположили, что благодаря формирующимся газопроводящим путям метан, высвобождаясь из донных отложений мелководного шельфа, в значительных количествах поступает в атмосферу арктического региона.

В полевых экспедиционных исследованиях отбирались пробы воды с разных глубин, содержание метана замерялось как в воде, так и в воздухе. В зимний период пробы воды получали путем бурения лунок в морском льду; концентрации метана в приповерхностном слое атмосферы изучали с вертолета, а высвобождение метана в виде пузырьковых факелов — с помощью гидроакустической аппаратуры. Оказалось, что в большинстве районов Восточно-Сибирского арктического шельфа придонные воды перенасыщены метаном по сравнению с его концентрациями в атмосфере, а на более чем 50% площади шельфа перенасыщены также и поверхностные воды. Степень перенасыщения варьировала от 880% в фоновых областях до 8300% в горячих точках. Зимние концентрации в 5–10 раз выше, чем летние, но с тем же распределением по глубине. Отмечен быстрый вертикальный транспорт метана в пузырьковых факелах; на большей

части площади шельфа они достигали поверхности, а в наиболее глубоких его частях — лишь подповерхностных вод. На преобладающий характер выделения метана в виде пузырьков указывают также газовые включения в сезонном льду, где содержание метана достигало 11 400 частей/млн.

В совокупности эти наблюдения показали, что основным источником потоков метана в атмосферу служат морские донные отложения; привнос метана с речным стоком Лены относительно незначителен. Практически вся толща воды от дна до поверхности перенасыщена метаном. Многолетнемерзлая «крышка», прежде препятствовавшая выходу метана из донных отложений в атмосферу, в настоящее время продырявлена во многих местах и продолжает разрушаться. Авторы указывают на необходимость дополнительных исследований, чтобы определить, является ли современная картина метановых потоков обычным, уже долгое время происходящим явлением, или же она предвещает намного более массивное высвобождение метана из-за потепления регионального климата.

Science. 2010. V.327. №5970. P.1246–1250 (США).

Палеонтология

Гигантские рыбы мезозойских морей

Самые крупные позвоночные, как уже вымершие, так и ныне живущие, — это обитатели морей, питающиеся планктоном, который они отфильтровывают из воды. Современные виды, занимаю-

щие эту экологическую нишу, сформировались в палеогене (66–33 млн лет назад); это усатые киты и четыре независимых группы хрящевых рыб, к которым относятся акулы и скаты. Трудно объяснить, почему еще недавно ученым были неизвестны крупные планктоноядные позвоночные мезозойской эры, когда уже существовали основные группы современного планктона.

Этот пробел в палеонтологической летописи восполнили британские и американские исследователи под руководством М.Фридмана (M.Friedman; Оксфордский университет, Великобритания), которые по окаменелым остаткам представили описание нескольких родов крупных примитивных рыб, относящихся к группе пахикормид. Изучавшиеся находки датированы началом среднего юрского периода — концом мелового, что составляет более 100 млн лет. Сохранившиеся скелетные остатки этих рыб фрагментарны и разрознены, однако их таксономическая принадлежность и экологическая специализация, судя по весьма характерной морфологии челюстного аппарата, не оставляет сомнений.

Длина тела некоторых из этих рыб составляла от 5 до 9 м, что сравнимо с размерами нынешних китовых акул, питающихся планктоном. По мнению палеонтологов, формирование современных групп крупных фильтраторов — китов, акул и скатов — стало возможным лишь после вымирания гигантских мезозойских рыб, занимавших ту же нишу на рубеже мела и палеогена.

Science. 2010. V.327. №5968. P.990–993 (США).

Тоталитаризм и орнитология

А.К.Сытин,
 Ботанический институт им.В.Л.Комарова РАН
 Санкт-Петербург

Еугениуш Новак — польский орнитолог, живущий в Германии, где традиции изучения природы, особенно ее пернатого населения, глубоко укоренены в национальных архетипах. К примеру, птицелов Папагено, персонаж «Волшебной флейты» Моцарта, антропоморфное существо, пройдя ряд испытаний, хоть и не становится посвященным в эзотерические таинства, но очеловечивается. Зигфрид, герой тетралогии Вагнера, обретает способность понимать язык птиц благодаря капле крови убитого им дракона. Но ни с какими вымышленными историями не сравнятся реальные испытания, которым подвергалась человеческая натура в условиях тоталитарных режимов XX в.: они не только сокрушали тела, но извращали сознание, убивали душу. Многие натуралисты не покорились чудовищным установлениям репрессивных систем, но были и такие, которые шли на соглашение с режимом.

Историку, ретроспективно наблюдающему развитие науки, оно может казаться спокойным течением реки. Рифы и мели, рождающие буруны и водовороты, известны лишь современникам. Среди них и автор этого уникального сборника биографий орнитологов. Птицам неизвестны ни административные, ни политические границы. Возможно, из этого обстоятельства проистекает вольнолюбивый, но порой анархический дух орнитологии. Новак, как опытный лоцман, уверенно прокладывающий фарватер, с бесстрастной точностью приводит докумен-

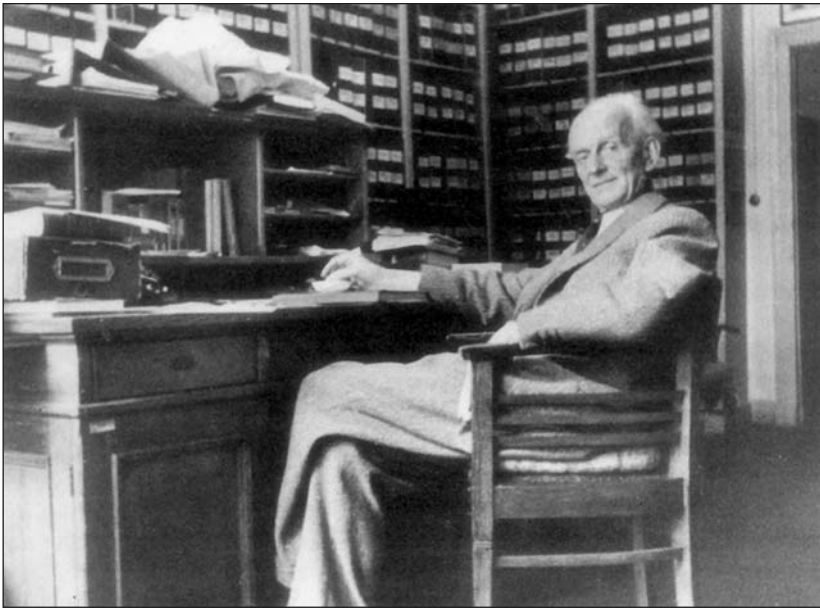
ты, сопровождая их анализом фатального противостояния системы антигуманного мироустройства и живого импульса исследовательской мотивации натуралиста.

Сопричастность автора влиятельной научной школе берлинского профессора Эрвина Штреземанна (1889—1972), одного из величайших зоологов ушедшего века, удостаивает его положения стража орнитологического чистилища. Мерой близости персонажей книги к Штреземанну определяется их научная квалификация и значимость. «Римским папой орнитологов» Штреземанна стали называть еще при жизни, и этот титул отражен в названии главы 1, где дан его весьма выразительный биографический портрет. В молодости он изучал авифауну Молуккских о-вов, где еще свирепствовали «охотники за черепами», — в экспедициях, организованных на средства владельца частного орнитологического музея лорда Вальтера фон Ротшильда (Тринг, Великобритания) еще до Первой мировой войны, когда колониальная система, казалось бы, имела перспективы. Штреземанн пережил калейдоскоп эпох немецкой истории: империю Вильгельма II, Веймарскую республику, Третий рейх, оккупационную власть союзников, ФРГ, ГДР. Жил он в Западном Берлине, а работал в Восточном Берлине, где заведовал орнитологическим отделом Музея. Именно благодаря Штреземанну Берлинская стена, разделившая нацию и город, не смогла пресечь живую связь его коллег, изучающих перелеты птиц. Под его руководством выполнил дипломную



Е.Новак. УЧЕНЫЕ В ВИХРЕ ВРЕМЕНИ: Воспоминания об орнитологах, защитниках природы и других натуралистах / Перевод с нем. И.М.Маровой. Ред. М.В.Калякин.

М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. 473 с.



Профессор Эрвин Штреземанн. Зоологический музей университета Гумбольдта в Берлине, середина 1950-х годов.

работу о динамике ареала кольчатой горлицы в Азии и Европе и автор книги.

Из 55 биографий ученых-натуралистов 17 немцев, 15 русских, 8 поляков, 2 француза, 2 корейца и по одному уроженцу других государств. Среди этого интернационального состава примечательно почти равное соотношение граждан России и Германии, отражающее творческое состязание в сфере познания естественной истории Евразии на протяжении трех столетий. Здесь уместно было бы вспомнить, что сам Штреземанн чрезвычайно ценил труды «русского немца» Петра Симона Палласа, именем которого назвал период в истории развития орнитологии*.

Афоризм «Орнитологи — лучшие из людей» сопутствовал Штреземанну в его счастливый период научной деятельности (1927—1934). Именно тогда вышла его книга «Птицы» — часть многотомного издания «Зоология», питавшего идеи развивавшейся тогда синтетической

теории эволюции. Он стал учителем многих выдающихся эволюционистов, в том числе лидеров этой теории — Эрнста Майра, Бернхарда Ренша, упоминаемых, но отнюдь не главных объектов повествования. Его интересуют не жизнеописания благополучных лауреатов, а экзистенциальные судьбы натуралистов в периоды острых социальных потрясений. 123 иллюстрации и хороший справочный аппарат, включающий список архивных и литературных источников — одно из достоинств издания, недостаток же — отсутствие точных ссылок на документы. В отношении наших соотечественников книга известным образом дополняет биографо-библиографическую серию «Московские орнитологи», но с точки зрения иностранца.

Архивные материалы неожиданно осветили трехлетний орнитолога Николая Алексеевича Гладкова (1905—1975). На фронт Второй мировой войны он ушел уже сложившимся, вполне успешным ученым, автором 41 публикации, многие из которых

посвящены исследованию полета птиц. Попав в окружение во время наступления войск Вермахта под Вязьмой в ноябре 1941 г., Гладков разделил бы участь 650 тыс. советских солдат, взятых в плен, которых не щадили и расстреливали, но Гладков в совершенстве владел немецким языком, что позволило ему войти в «добровольные силы немецкого Вермахта» (*Hilfswilliger der deutschen Wehrmacht*, сокращенно «Hiwi») и служить переводчиком. В этом статусе он оставался почти до конца войны. Косвенным оправданием измены могло бы стать то обстоятельство, что кроме своей собственной, Гладков спасал жизни многих своих соотечественников, так как отвечал за снабжение военнопленных продовольствием, но сильнейшим мотивом была и страсть к изучению птиц.

Профессионализм орнитолога не остался незамеченным. Ему позволили написать Штреземанну в Берлин. В письме Гладков предлагает использовать себя как «иностранную рабочую силу» для научных целей. После нескольких настойчивых, но безуспешных обращений возникла переписка. Заинтересованный Штреземанн направил особому уполномоченному в Берлине по использованию рабочих из оккупированных стран (*Sonderbeauftragter für den Arbeitseinsatz, S.B.A.*) официальный запрос от дирекции музея. Штреземанн сообщил, что Гладков выполняет работы, не соответствующие его профилю, и что было бы целесообразнее применить его способности в орнитологическом отделе Зоологического музея университета Берлина, где вследствие мобилизации возник недостаток во вспомогательном научном персонале.

Просьба не была удовлетворена, но отпечатки новейших работ по авифауне, полученные Гладковым от Штреземанна, сулили надежды на возвращение в науку. Вскоре Гладков смог пересылать деньги с Восточного

* *Stresemann E. Ornithology from Aristotle to the Present. Cambridge, 1975.*

фронта в Берлин на приобретение орнитологической литературы, подписался на «Journal für Ornithologies». В письме от 1 сентября 1943 г. он осведомился: «Могу ли я просить Вас еще о справке, проводит ли Немецкое орнитологическое общество также и теперь свои годовые собрания? Если я смогу получить отпуск, то я мог бы организовать все таким образом, чтобы принять участие в заседании» (с.164—165). 13 марта 1944 г. Гладков писал: «Я был бы также благодарен Вам, если Вы сможете приобрести для меня учебник зоологии из тех, какие обычно используются в немецких университетах. Мы все желаем, чтобы поскорее пришло время, когда мы сможем использовать эти труды». В конце этого письма автор обращается к Штреземанну с еще одним вопросом, довольно неожиданным: «Существует ли для меня возможность провести причитающийся мне отпуск на одной из орнитологических станций (например, в Росситтене*), чтобы познакомиться там с весенней работой?».

Штреземанн откликнулся на желание Гладкова, и уже 27 марта 1944 г. тот получил официальное приглашение от доктора Эрнста Шутца, директора орнитологической станции Росситтен. Этой возможностью Гладков не преминул воспользоваться: «Я участвовал в рабочих буднях станций и совершил много экскурсий. Кольцевание молодых скворцов не требует большого искусства, но с аистами я потерпел неудачу. Эта работа не для меня: на высоте у меня кружится голова. В окрестностях Росситтена я нашел не все, что мог ожидать по моим представлениям в подобном ландшафте. Кукушек нет, соловья слышал

* Росситтен, или Рыбачий, — первый в мире научный центр для изучения миграций птиц, основанный в 1901 г. Немецким орнитологическим обществом. Ныне там биологическая станция Зоологического института РАН, расположенная на территории природного национального парка «Куршская коса».

только один раз и не рассмотрел». За этим описанием следуют еще два почтовых листа, посвященных орнитологическим темам. В конце письма Гладков сетует: «В Кёнигсберге был в самом большом книжном магазине — купить нечего. Жаль».

Гладков вступает и в дискуссии с авторами «Journal für Ornithologie», подвергнув жесткой критике работу Эриха фон Гольста «Модели птиц как средство изучения их полета» (1943. V.91. P.406—447), которую он отправил Штреземанну в письме от 9 апреля 1944 г. (и которую издатель журнала несомненно передал автору).

Однако идиллия продолжалась недолго. Уже на обратном пути из Росситтена Гладков оказался в гуще военных действий — началось большое летнее выступление Красной Армии против группы армий «Центр». Вскоре (13 июля 1944 г.) Штреземанн получил короткое, написанное от руки письмо, отправленное полевой почтой. Гладков писал: «Я остался жив и здоров. Но мой прежний адрес и все, что я имел, даже книги, которые я привез из Росситтена, утрачено. При первой возможности я сообщу Вам мой новый адрес. <...> Теперь я нуждаюсь в каком-нибудь французском словаре, безразлично, что это будет за словарь — большой или совсем краткий. Я основательно забыл этот язык. Главное, чтобы книга пришла более или менее быстро, пока я еще нахожусь поблизости. Природа здесь не слишком прекрасна. Много песка. Но я имел здесь возможность наблюдать канареечного вьюрка, птицу мне раньше совершенно незнакомую». Эзоповым языком Гладков намекает о передислокации подразделения на оккупированные территории Франции или Бельгии. Указание видов птиц и характера ландшафта выдает его настоящее местопребывание — окрестности Бранденбурга.

Замечу, солдаты войск Вермахта располагали относитель-

ной свободой для частных занятий. В свое время меня удивляли в гербариях Берлина и Мюнхена образцы растений, собранные немецкими коллекторами буквально среди окопов Сталинграда.

Трехлетнее заочное знакомство двух орнитологов увенчала посылка сигарет с Западного фронта в Берлин. Этот дар привел в восторг изголодавшегося по куреву Штреземанна, которому приходилось набивать трубку смесью лекарственных трав. Гладков возвратился в Советский Союз 7 ноября 1944 г. и снова стал солдатом Красной Армии, но не в боевом подразделении, а в строительном батальоне, дислоцированном в Таллине. СМЕРШ допрашивал Гладкова за две недели до окончания войны и не выявил ничего предосудительного, его анкета была «чиста». Поработав ночным сторожем два года и защитив докторскую диссертацию, посвященную биологическим основам полета птиц, в 1947 г. он вернулся в Зоологический музей МГУ, где его дальнейшая научная деятельность протекала необычайно интенсивно. В 1952 г. за шеститомное издание «Птицы Советского Союза» авторский коллектив под руководством Г.П.Дементьева и Н.А.Гладкова получил Сталинскую премию.

В начале 1950-х годов Гладков стал профессором Московского университета, вступил в партию, развивая активную общественную деятельность и стараясь привлечь внимание политиков к природоохранным темам посредством идеологической аргументации («Вопросы охраны природы в свете решений XXII съезда КПСС», «Ленинские принципы охраны природы», «Охрана природы в первые годы советской власти»). Постепенно восстановилась и связь с Штреземанном, благодаря которому первые два тома «Птиц Советского Союза» появились в книжных магазинах Восточного Берлина. В Берлинском архиве хранится их переписка за

1955—1972 гг. В ней нет ни единого упоминания о военном времени (с.173).

Военнопленным был и Конрад Лоренц (1903—1989) — крупнейший этолог, лауреат Нобелевской премии. Он отбывал срок в советских лагерях в Армении и под Москвой с 1944 по 1947 г. В деле Лоренца есть также два экземпляра (копии, сделанные под копирку) напечатанной по-немецки на пишущей машинке рукописи его большой книги «Введение в сравнительное исследование поведения», которую ему при освобождении разрешили взять с собой в Австрию*. Свою «антифашистскую» работу в лагере он описывал в 1973 г. так: «Я имел [там] возможность наблюдать очевидные параллели между психологическим воздействием национал-социалистского и марксистского воспитания. Именно тогда я начал понимать сущность [воздействия] доктрины как таковой» (с.236).

После возвращения на родину Лоренц сразу же продолжил научную работу и публицистическую деятельность. В 1951 г. Общество Макса Планка предоставило ему институт в Германии. Интенсивная исследовательская работа, десятки аспирантов и учеников полностью заполняли каждый день его послевоенной жизни. Он писал новые книги, которые всегда поставляли материал для размышлений и интеллектуальных споров. Нобелевская премия и уход на пенсию в 1973 г. несколько не отменили его научной и публицистической деятельности. В последующие годы он много занимался общественной деятельностью. Его работы переводились на разные языки. Он много путешествовал, правда, в Советский Союз ехать не хотел. В 1977 г. академик В.Е.Соколов пригласил Лоренца в СССР. К тому времени его книги уже были переведены на русский язык, стали очень популяр-

ны, и визит автора стал бы настоящей сенсацией. Но Лоренц отказался — улыбнувшись, он задумчиво ответил: «Мне уже приходилось бывать в вашей стране...» (с.236).

Александр Николаевич Формозов (1899—1973) — зоогеограф, эколог, художник, писатель и педагог — не любил вспоминать о Гражданской войне. Ему пришлось лицом к лицу столкнуться с ее жестокостями, он побывал в плену, о чем рассказывать было опасно.

В начале 1919 г. юный Формозов был отправлен на Южный фронт. Часть, в которой он служил, оказалась в Саратовской обл. Об этом есть запись в дневнике: «У г.Балашова, в селе Репном, наблюдал ход весны. Всю зиму здесь на дороге видел парочку хохлатых жаворонков. <...> В холодные дни они, надувшись комочками, бегали по дороге прямо под ногами, в солнечные утра самчик вполголоса пел, притулившись среди отбросов так, что его даже и не заметишь. <...> Из весенних цветов для меня был новым подснежник. В конце апреля — начале мая сильно пели соловьи и кричали по утрам удода. Видел домового сыча на ветряной мельнице. Зимой держались волки».

В мае того же года инженерно-саперную часть, в которой служил Формозов, перебросили в занятую красными немецкую колонию Сарепта на Царицынский фронт (ныне в черте Волгограда). Зимой здесь шли ожесточенные бои с белыми, но к весне они были отброшены. Часть должна была заниматься созданием здесь линии укрепления для отражения контрнаступления белых. Сохранились дневниковые записи на новом месте: «Не доезжая Царицына, примерно со станции Котлубань, начинаются в степях большие поселения и дальше целые города сусликов, которые сидят у своих нор при прохождении поезда. <...> Растительность совсем иная: по степям полынь, луковичные растения (тюльпаны,

чеснок и др.), ковыль и масса мне неизвестных. <...> Здесь колонии грачей, с ними пустельга, кобчики, у опушки сизоворонки, удода. Щурки золотистые вечерами летали над цветущими кустами довольно низко, днем же они держатся стаями и высоко». Пленный красноармеец Формозов, конвоируемый в тыл мимо казачьих станиц, в любую минуту рисковавший получить пулю, умереть от тифа или переутомления, делал наблюдения в степях над Доном в лунную ночь: «видел много тушканчиков, скакавших вдоль дороги, некоторые таскали за собой метелки незрелого овса, которым лакомились» (с.361). Эти заметки пленного красноармейца свидетельствуют о том, что биологи обладают особым даром наблюдения, который позволяет им абстрагироваться от реалий военного или лагерного быта, не загружая нечеловеческими ужасами сознание. Созерцание природы обладает исцеляющим свойством, гармония способствует долголетию — Формозов прожил долгую и плодотворную жизнь в науке, не разрушив свою личность конформизмом и соглашательством.

Эрнст Шеффер (1910—1992), выдающийся исследователь Тибета, путешественник и коллектор, автор множества популярных книг, орнитолог. Защитил диссертацию под руководством Штраезманна, впоследствии стал специалистом по птицам Венесуэлы. Это был к тому же охотник и авантюрист, спекулировавший на интересе власти к оккультизму, в частности к поискам подземной Агарты — легендарной древней цивилизации Тибета.

Шеффер удовлетворял личную потребность в путешествиях и карьере за счет финансирующих его разведывательных организаций. Так, принадлежа к кругу друзей Гимmlера, он создал псевдонаучную структуру СС «Ahnenerbe» («Наследие») и организовал ряд тайных экс-

* Подробнее см.: *Гороховская Е.А.* «Гусиный отец» // Природа. 2004. №3. С.60—67.

педиций рейха под грифом «совершенно секретно». В 1939 г. Шеффер, уже трижды побывавший в Тибете, отправился туда вновь с небольшим отрядом примерно из 30 человек и вооружением на 1—2 тыс. человек, чтобы провести операцию «Тибет». Спустя годы Бегер — один из спутников Шеффера — сообщил историку Михаэлю Катеру, что передовой отряд Шеффера имел поручение с помощью подарков «настроить тибетскую армию против британских войск. Он должен был обещать тибетцам свободу от английских эксплуататоров». После возвращения Шеффера из Тибета Гиммлер наградил его особым перстнем СС с печаткой-черепом и почетной шпагой. В апреле 1942 г. была запланирована экспедиция на Кавказ, которую готов был возглавить Шеффер, но перелом хода войны изменил планы. В 1943 г. Шефферу удалось превратить свой отдел «*Ahnenerbe*» в государственное учреждение — Институт им. Свена Гедина*, занимающийся исследованиями Центральной Азии. Позже он переехал из Мюнхена в замок Миттерзилль, который находился в Австрии, присоединенной к рейху. Шеффер взял на работу своих старых товарищей по Тибету — Б.Бегера, Э.Геера, К.Винерта и Э.Краузе. Любопытно, что тема мистических поисков «*Ahnenerbe*» сейчас популярна у любителей альтернативной истории и мифотворцев.

К счастью, в истории истинной воплотились притчи о мудрецах и праведниках, преодолевающих Зло терпением, смиренностью и упорством. Трудно найти образец большей стойкости, чем профессор Ченг Цо-Син (1906—1998) — один из основоположников орнитологии Китая, терпевший унижения и из-



Профессор Ченг Цо-Син. Зоологический институт в Пекине, 1993 г.

девательства режима. Получив образование в США, Ченг преподавал в университете Фучжоу, а с 1953 г. стал куратором орнитологического отдела Зоологического института АН Китая. С поразительной энергией и продуктивностью он изучал и описывал фауну птиц Китая. По предложению Штреземанна его приняли в члены-корреспонденты немецкого Орнитологического общества. На обратном пути в Китай Ченг посетил Зоологический музей МГУ и Зоологический институт АН СССР в Ленинграде, где хранятся обширные сборы из Китая; в 1958 г. Ченг снова приезжал на несколько месяцев в Советский Союз для работы над сводкой птиц Китая.

Вскоре произошло резкое обострение отношений китайского и советского руководства. Сотрудничество с СССР и государствами восточного блока было полностью прекращено. Но китайские зоологические экспедиции в различные регионы страны продолжались по намеченному плану. Катастрофа разразилась в 1966 г., когда Мао Цзэдун провозгласил новый политический курс, печально из-

вестный как «Великая пролетарская культурная революция». Научная деятельность в Зоологическом институте прекратилась, коллекция птиц Ченга, библиотека и все прочие отделы были закрыты, любые публикации запрещены. Дни проходили в нескончаемых идеологических дискуссиях. Был провозглашен лозунг: «Чем больше ты знаешь, тем больше подозрений, что ты — реакционер!». Ченг был разоблачен как «уголовный преступник», поскольку он возражал против борьбы с воробьями и тем самым критиковал курс великого Мао. Птицы были заклеены как «комнатные животные капитализма», а их изучение при социализме квалифицировано как «проявление мещанства и ревизионизма, ведущих к ослаблению государства».

Профессор Ченг, как и многие другие ученые, должен был носить табличку с надписью «Реакционный авторитет» и был отправлен на перевоспитание физической работой. В его обязанности входило подметание дворов и туалетов. Издевательский характер носил и «экзамен по специальности», который

* Гедин (Hedin) Свен Андерс (1865—1952) — шведский географ и путешественник, исследователь Центральной Азии и Трансгималаев (Гандисышань). Его коллекции хранятся в Музее естественной истории в Стокгольме.

должен был пройти профессор Ченг. Ему было предложено определить видовую принадлежность птиц, «слепленных» из разных тушек, и снять шкуру с доставленного ему умерщвленного голубя (известно, что голуби имеют нежную кожу, которая легко рвется при препарировании). Ченг провалил «экзамен», и его зарплата была снижена до скудного минимума. Затем с целью «перепроверки и самокритики» его полгода содержали в коровнике (с.288).

К счастью, Ченг пережил и Мао, и культурную революцию. Рукопись второго издания его основного труда «Список и распространение птиц Китая» чудом сохранилась в издательстве. Он возобновил работу с коллекцией Зоологического

института, выросшей до 60 тыс. экземпляров, а в 1986 г. по его инициативе возникло Китайское орнитологическое общество. Ченг был удостоен множества национальных и международных наград, отметил золотую свадьбу с женой и работал до последнего дня вопреки рекомендациям врачей, отвечая на их советы щадить себя: «Если я не смогу работать, то мне незачем дольше жить» (с.292).

Приведенные примеры, лишь выборочно отражающие содержание книги, рисуют условия, в которых работали, выживали или гибли люди в XX в. Осуждать их нельзя... Неизвестно, как бы повел себя каждый из нас, оказавшись на их месте. Главное — не допустить рецидива эпидемий тоталитаризма, в планетар-

ном масштабе уничтожавших цивилизации. Изоляционизм и невежество все чаще напоминают о себе в XXI в. Необходимо помнить, во что они обходятся человечеству... Опыт разрушения Берлинской стены и подлинного восстановления наследия прошлого можно определить простой фразой: «Brücken bauen — versöhnung leben» («Строить мосты — жить в согласии») — выстраданное правило, которое можно было прочесть совсем недавно на строительных лесах Фрауенкирхе, одной из архитектурных жемчужин Дрездена, разрушенной во время бомбардировок в годы Второй мировой войны и поднятой из руин доброй волей людей, сохраняющих культуру. Той же цели служит и книга Еугениуша Новака. ■

Космические исследования

Э.М.Галимов. ЗАМЫСЛЫ И ПРОСЧЕТЫ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РОССИИ ПОСЛЕДНЕГО ДВАДЦАТИЛЕТИЯ. ДВАДЦАТЬ ЛЕТ БЕСПЛОДНЫХ УСИЛИЙ. М.: Едиториал УРСС, 2010. 304 с.

Автор — академик Российской академии наук, член Президиума РАН, директор Института геохимии и аналитической химии им.В.И.Вернадского, председатель Комитета по метеоритам РАН, член бюро Совета по космосу РАН.

В своей книге он рассказывает, как складывалась в последние 15—20 лет организация планетно-космических исследований в России. Несмотря на отдельные интересные идеи и частные достижения, деятельность эта была крайне непродуктивной. За прошедшие годы в России не было сделано ни одного запуска в сторону Луны и планет. Не-

смотря на большие затраты, не вышел на орбиту ни один из трех астрофизических спутников серии «Спектр», предназначенных для исследования дальнего космоса. В то же время США, европейские страны, Китай, Япония, Индия запустили десятки космических аппаратов и сделали крупные открытия в познании Солнечной системы.

Книга имеет не только научную, но и публицистическую направленность. В ней приведены многочисленные документы, анализируя которые, читатель может увидеть, в чем состояли просчеты, приведшие в итоге к тому, что за последние 20 лет конечные цели так и не были достигнуты.

Издание адресовано не только специалистам космической отрасли и ученым, но и широкому кругу читателей. Автор надеется, что книга поможет извлечь уроки из сделанных просчетов и послужит лучшей организацией дела в будущем.

Планетология

О.Л.Кусков, В.А.Дорофеева, В.А.Кронрод, А.Б.Макалкин. СИСТЕМЫ ЮПИТЕРА И САТУРНА: ФОРМИРОВАНИЕ, СОСТАВ И ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ КРУПНЫХ СПУТНИКОВ / Отв. ред. М.Я.Маров. М.: ЛКИ, 2009. 576 с.

В книге обсуждаются формирование, внутреннее строение и химическая дифференциация тел внешней части Солнечной системы, где водяной лед вместе с другими видами льдов (метановым, аммиачным, углекислым и др.) становится главной составляющей спутников планет-гигантов, а также карликовых планет и астероидов, расположенных за орбитой Нептуна.

В динамике небесных тел, населяющих Солнечную систему, наряду с характерными природными особенностями существуют определенные общие закономерности, обусловленные единым процессом происхождения и последую-

щей эволюции Солнечной системы. Чрезвычайно важно попытаться сопоставить то, что известно о природных явлениях на Земле и в системе Земля—Луна, со сведениями о других планетах и их спутниках, включая взаимодействие с малыми телами — кометами и астероидами. Сравнительно-планетологический подход особенно эффективен при изучении многочисленного семейства спутников планет-гигантов, происхождение, внутренняя структура и свойства орбит которых существенно зависят от физико-химических особенностей газопылевых аккреционных дисков планет и в значительной степени определяются приливными взаимодействиями.

В издании приводятся астрофизические данные о газопылевых дисках вокруг звезд солнечного типа, о внесолнечных планетных системах и основанные на них современные представления об образовании и эволюции планетных тел, а также новейшая информация по системам Юпитера и Сатурна, полученная космическими аппаратами «Галилео» и «Кассини-Гюйгенс».

Особое внимание привлекают галилеевы спутники Юпитера — Ио, Европа, Ганимед и Каллисто, которые образовались, вероятно, одновременно с самой планетой вблизи нее и в дальнейшем увеличили свои радиальные расстояния вследствие приливного воздействия Юпитера. Обсуждаются интригующие проблемы, связанные с возможностью существования приповерхностных океанов под ледяной корой Европы, Ганимеда, Каллисто, Титана и Энцелада, а также металлических ядер в недрах ледяных спутников Юпитера и Сатурна.

Вниманию читателей предлагаются разработанные авторами модели происхождения,

состава и внутреннего строения спутников планет-гигантов.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов, аспирантов и студентов — геохимиков, геофизиков, космохимиков и астрономов, занимающихся проблемами эволюции и строения тел Солнечной системы, а также может служить справочным пособием для научных работников.

Генетика

П.М.Бородин. КОШКИ И ГЕНЫ.

Изд. 2-е, испр. М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2010. 136 с.

Если вы хотите узнать все о генетике кошек, и не только о них, вам обязательно надо прочитать эту замечательную книжку. Она написана легко, интересно и понятно для большой аудитории и решает, по словам автора, известного генетика и популяризатора науки, две задачи. Во-первых, дает современное представление о наследовании окраски и других экстерьерных признаков кошек, об их поведении и врожденных заболеваниях. Во-вторых, благодаря широкому интересу читателей к кошкам способствует распространению знаний о закономерностях наследования признаков у животных и человека, о принципах селекции и эволюции.

В соответствии с этими задачами и построена книга. В первой главе — рассказ об организации генов, особенностях их работы, о мутационном процессе, устройстве хромосом и других общебиологических вопросах исключительно на кошачьих примерах. Во второй даны представления о том, как у котов организован процесс развития от момента оплодотворения до его полного завершения, и описаны все известные сегодня мутации у кошек. Следующая глава посвящена общим для всех орга-

низмов принципам генетики, а законы Менделя проиллюстрированы симпатичными схемами с кошками. В четвертой обсуждается проблема непорочного зачатия в свете современной генетики. В пятой рассказано о том, что сегодня известно об эволюции семейства кошачьих и их родстве с человеком. Шестая глава — это увлекательный рассказ о черных, белых, мраморных и рыжих бродячих котках, изучение которых дает представление о географии кошек. В следующей главе даны практические рекомендации поведению любителей наблюдать за бродячими котками. Здесь же приводятся полевой определитель кошачьих мутаций и генетические задачи. Последняя глава — о научных принципах селекции, ведь огромное разнообразие кошачьих пород — результат многолетних трудов селекционеров. В конце книги приведены ответы на генетические задачи, словарь биологических терминов, рекомендуемая литература и ресурсы Интернета по генетике и селекции кошек.

Первое издание книжки вышло в 1995 г., а написана она была еще раньше — в 1988 г. Несмотря на то что за прошедшие годы генетика кошек ушла вперед и появилась масса новой фенологической литературы, книжка не устарела (кроме рекомендованной литературы). Новые данные о структуре и функции генетического аппарата касаются в основном деталей, а фундамент остался прежним. Автор оставил в книжке прежний текст, удалив из него устаревший материал, и добавил новые данные, в частности сведения о расшифровке генома кошек, рассказ о клонировании и получении генетически модифицированных кошек, о родословном древе млекопитающих вообще и кошек в частности.

Взгляд в прошлое

В конце номера

Эти отрывки из воспоминаний принадлежат перу Наталии Борисовны Семихатовой (1922—2009). В 60-е и 70-е годы она заведовала отделом наук о Земле редакции журнала «Природа». И сегодня среди наших авторов есть те, что вспоминают ее с благодарностью за науку популяризации.

Наталия Борисовна родилась в Москве 4 апреля 1922 г., раннее ее детство прошло на окраине города — на Соломенной Сторожке, что недалеко от Тимирязевской академии. Здесь преподавали геологию ее отец Борис Николаевич и его брат Александр Николаевич. Это место было настоящим раем для детей (Наташи и ее двоюродных братьев и сестер). Около дома лес, недалеко поле с высокой травой, пруд. В 1930 г. семья переехала «в город» (отец уволился из Академии) и несколько раз меняла адрес, пока не поселилась в кооперативном доме на Зубовском бульваре. Когда в 1940 г. школа была окончена, вопрос о том, куда поступать, не стоял: на географический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Здесь хорошо помнили мать Наташи (мамочку, как любовно называет она ее в воспоминаниях), геоморфолога Лидию Ивановну Семихатову, открывшую на Алтае пять новых ледников. Она умерла молодой, заразившись в последней экспедиции монгольской чумой.

Окончание первого курса совпало с началом войны, и Наталия отправилась в эвакуацию сначала в Пензенскую обл., а потом в Киргизию — во Фрунзе. На Иссык-Куле она впервые приняла участие в геологической экспедиции. Только в 1943 г. занятия в университете возобновились, и каждый год обычно заканчивался полевыми работами. После окончания учебы 15 лет работала в тресте специального геологического картирования «Спецгео». В 1953 г. она вышла замуж за историка и слависта Льва Сергеевича Кишкина (1918—2000), и он иногда даже сопровождал жену в экспедиции. Затем по состоянию здоровья полевые условия Наталии Борисовне стали противопоказаны и пришлось искать другую работу. В воспоминаниях она рассказывает, как в 1960 г. ей «уступил» свое место в «Природе» Л. С. Абрамов, знакомый по университету и эвакуации, как благосклонно встретил ее главный редактор журнала в те годы Д. И. Щербаков. Работать было интересно и легко: у нее — потомственного географа — было много знакомых. Да и темы статей были близки. Интересы семейной пары Семихатовых — Кишкин были очень широкими: они не только много работали, но и много путешествовали по России. В начале 60-х годов, переселившись в кооперативную пятиэтажку на Рублевском шоссе, посадили рядом с домом настоящий лес, где водились ягоды и грибы. Семихатова писала для нашего журнала материалы о новых книгах, новостях науки, участвовала в выездных устных выпусках «Природы».

После выхода на пенсию в 1977 г. Наталия Борисовна не переставала работать со словом, во всем помогая как редактор и машинистка своему мужу. Доктор исторических наук, специалист по чешской культуре, Кишкин — автор 13 книг, и во многих из них незримо присутствует Наталия Борисовна. Среди многочисленных публикаций Кишкина особое место занимают «Чехословацкие находки. Из зарубежной пушкинианы» (М., 1985). Эта книга хранится в мемориальном кабинете Л. С. Кишкина в Государственном музее А. С. Пушкина, другом которого он был много лет (когда Льва Сергеевича не стало, Наталия Борисовна передала в дар музею архив своего мужа, его библиотеку, семейные реликвии). В последние годы Семихатовой удалось расшифровать и перепечатать дневниковые записи мужа, в частности опубликовать несколько рукописей, в том числе «Пушкин и Чехия» (М., 2005), «Люди пушкинской поры» (М., 2009).

Воспоминания Наталья Борисовна начала писать не так давно, но окончить не успела — в декабре прошлого года ее не стало. Из 100-страничной рукописи, напечатанной на старенькой машинке, мы решили отобрать для «Природы» экспедиционные отрывки, относящиеся к 40-м и 50-м годам. Получились небольшие рассказы, порой смешные, порой грустные, — в них забытые будни геологических партий. В публикации использованы фотографии из домашнего архива Н. Б. Семихатовой.



Н. Б. Семихатова. Конец 40-х годов.

Мышиный налет

<...> Наверное, стоит написать об экспедиции в Сибирь в 1944 г., после окончания второго курса. Время военное, все студенты стараются пройти летнюю практику поближе к Москве. Но нашлись две, которые хотели уехать как можно дальше. В деканате нам дали адрес треста «Золото-разведки». И вот мы с Валей Иваничкой поехали наниматься на работу коллекторами. Нас взяли сразу. Сказали, куда ехать, дали денег на дорогу. Партия уже начала работать, и мы должны были ехать вдогонку сначала в Читу, а оттуда на север, через Яблоневый хребет к р.Витим. <...>

Итак, прежде всего, получив деньги в «Золото-разведке», мы пошли с Валей в только что открывшийся коммерческий магазин и купили несколько плиток шоколада с тем, что если в экспедиции будут трудности с питанием, мы себя им поддержим. В первые годы войны, конечно, никто из нас о шоколаде не думал — его нигде не продавали. А мы были счастливы — мы увидим Байкал! Ехали, наверно, недели две, уже не помню. Наши места были в последнем вагоне. И вот поезд мчится по южному берегу Байкала. В вагоне народу очень мало, один дядечка все нам рассказывал, сколько поездов здесь потерпели крушения, погибли в водах глубочайшего озера... Действительно, вагон последний очень сильно наклонился в сторону Байкала, и мы даже боялись сделать шаг к окну, чтобы посмотреть на воду. С другой стороны вплотную прилегали скалы, и из окна не было видно неба — так они были высоки. А слева, буквально рядом с рельсами, — вода. Мы-то с Валей знали, что озеро образовалось в результате так называемого грабена (по разломам оно опустилось на большую глубину). Ехать было и интересно, и очень тревожно. А тут еще этот сосед нас расстраивал. Тогда мы с горя решили хотя бы съесть шоколад — чтоб не пропал, если окажемся на дне озера. Что мы и сделали, а потом очень жалели, так как благополучно проскочили Байкал, остались живы, а вот во время экспедиции месяц голодали, так как Александр Александрович Семенов (так звали начальника нашей партии) продал паяк всей нашей партии в Чите и купил себе дом в селе Романовка на тот случай, как он говорил, если немцы займут Москву и мы войну проиграем — он останется жить в Сибири, тем более что приехал туда со всей семьей.

Конечно, этот месяц, что мы были лишены продуктов, был для нас очень тяжелым. Кстати, когда мы приехали в лагерь, то оказалось, что там уже работали две девочки с нашего факультета. Мы питались четвером, варили супы, пекли лепешки из муки по очереди. Каши варили, жарили грибы, которые собирали в маршрутах, ели ягоду

с сахаром и т.д. А когда наступил голод, при выходе в маршрут первым делом искали не обнажения, а «месторождение» ягод. Только после того, как наедались, начинали работать. Слава Богу, у нас еще было немного муки, из которой мы на четверых могли варить «затируху». <...>

Еще об одном эпизоде во время экспедиции очень коротко сказано в моем дневнике. На одной из баз во время ночевки меня укусила за нос мыш. Четыре зуба вцепились сверху и снизу за самый кончик. Я помню, что ночью лицо было мокрым. Я его вытерла ладонью и продолжала спать. Боли не помню. Утром у нас было правило: все 15 человек, включая рабочих, садились в своих спальных мешках, желали друг другу доброго утра и рассказывали, что кому снилось. Так и в это утро мы сели и вдруг разразился дикий хохот: все указывали на меня. Оказывается все мое лицо было в крови. И я до сих пор не могу понять, почему это вызвало хохот всей партии. <...>

Нос немножко распух, но в маршрут идти все же пришлось. Наши рабочие, местные буряты, говорили, что нам нельзя оставаться на другую ночь в этом лагере, так как мыш обязательно опять укусит меня. Но наша геологиня не успела что-то досмотреть и настояла на второй ночевке. Я постаралась предусмотреть все возможное, связанное с «нападением» мыши во второй раз. Но мы так устали, еще ведь были и голодными, что гостя меня все же посетила. Я проснулась на этот раз от острой боли, схватила что-то теплое, мягкое и швырнула к двери палатки, высунувшись из спального мешка. Крови было много, а утром все лицо превратилось в сплошную массу, и не видно было, где нос, а где глаза. Состояние было отвратительным и я даже не ходила в маршруты. Со временем опухоль спала, и все кончилось благополучно.

Ждали, будет золото

<...> Как только я поступила на географический факультет МГУ, сразу стала мечтать попасть в экспедицию на Алтай, где работала мамочка. <...> И вот на 3-м курсе мне сказали, что на геологическом факультете профессор Евгения Марковна Великовская собирается в экспедицию на Алтай и набирает себе студентов. Я помчалась на геофак, благо мы располагались в одном корпусе (еще и с почвоведками).

Познакомилась с Евгенией Марковной, рассказала ей о своей мечте, о мамочке, ее работах на Алтае и т.д. Но Е.М. мне сказала, что уже две девочки с геологического факультета у нее есть и она хочет взять мальчика. Я ушла огорченная. Действительно, вскоре я узнала, что она с нашего курса взяла Вовку Жукова. Он на курсе у нас, девушек,

В
каше
и
темпера



Лидия Ивановна, Борис Николаевич и Наташа Семихатовы.
Соломенная сторожка, 1927 г.



С мужем Львом Сергеевичем Кишкиным. 1953 г.



Экспедиция на Алтай и в Монголию. Справа — Л.И.Семихатова.

«не котировался», был уж очень скромным, не проявлял себя ничем в отличие от нашей тройцы — Галки Чернышевой, Дины Фарбман и меня, которых на факультете звали «три танкиста, три веселых друга». Галка у нас играла на пианино, Дина пела, а я танцевала русско-боярский танец, го-пак, венгерку (для этого у меня сохранились костюмы с детских лет, а так как я была страшно худая, то они мне все были впору). Без нас, как правило, не проходило ни одного факультетского праздничного вечера. Кроме того, я сразу же включилась в работу геоморфологического кружка и делала там разные доклады. Помню, один был об Огненной Земле, исследованиях, если не ошибаюсь, Альбова.

Но это все попутные воспоминания. Главное в другом. Весной мне передали, что Евгения Марковна хочет со мной поговорить. У меня появилась надежда на возможную поездку на Алтай, и она оправдалась. Меня зачислили в экспедицию от того учреждения, от которого мы с Валюшей Иваничкой ездили в Сибирь — от «Золоторазведки». Я стала готовиться, читать интереснейшие материалы по геологии, тектонике, геоморфологии тех мест, куда должны были ехать.

Пожалуй, чтобы было понятно, о чем будет написано далее, следует сказать, что, во-первых, мне предстояло ехать не в Горный Алтай, а в его предгорья на территории Казахстана. Во-вторых, известно было, что там работал академик Обручев. В частности он считал, что на этой территории расположены так называемые грабены, т.е. вся поверхность разбита была в свое время разломами, по которым произошло мощное смещение поверхности земли, образовав таким образом среди гор широченные как бы долины, по которым впоследствии текли реки, размывающие в своих верховьях золотоносные породы. По долинам таких рек размещались деревни, в которых жили многие годы золотоискатели, которые на протяжении этих лет промывали песок рек и добывали золото, и сдавали его государству. Жили зажиточно. Это были в основном казахи.

И вот прошло очень много лет, и золото перестало попадаться в промываемых песках. Встал вопрос о переселении многих деревень и поселков золотоискателей. А это — для жителей — трагедия: сниматься с насиженных мест. Вот тут вмешались ученые. Е.М.Великовская тоже работала в этих районах, и она не согласилась с академиком Обручевым. Она предположила, что вся эта территория пересечена не грабенами, а древними речными долинами. А если так, то, может быть, в этих местах можно найти и золото, погребенное под последующими, более поздними, отложениями. Но это надо было еще доказать.

Вот для этой цели и была сформирована наша экспедиция, хотя война еще не кончилась. И у Е.М. были очень авторитетные противники, защитники теории Обручева. Забегая вперед, скажу, что

один из них, не буду называть его фамилию (известный исследователь тех мест, доктор геологических наук) даже после того как были доказаны предположения Е.М. и найдено погребенное золото, и таким образом не стали переносить деревни и поселки на новые места, писал в правительство о том, что Е.М. преступница, так как нарочно ориентирует власть в заведомо ошибочном направлении, и в золотопромышленности — в частности. Это она узнала, когда защищала свою докторскую диссертацию по своим работам в Предгорном Алтае. Вот этими изысканиями мы, студенты, и занимались. Когда же выяснилось, что есть такие страшные отзывы на наши работы, нам стало не по себе. К тому времени война только кончилась. Слава Богу, все в конце концов завершилось благополучно, и Е.М. не пострадала.

Наша работа, коллекторов, заключалась в том, чтобы следить за бурением долины р.Жанама, где и располагался наш первый лагерь, описывать керны и, когда на глубине около 20 м появился галечник, составлять карту и вырисовывать по галечнику возможное древнее русло древней реки, ныне погребенной. Занятие было увлекательнейшим. Одновременно мы по очереди ходили в маршруты, фиксировали направления древних долин, собирали образцы и пр. <...>

Работа была интересной, но и очень напряженной. Главное — ждали, будет золото! По предварительным скважинам рабочие долбили так называемые «дудки» — круглые, до метра в диаметре, ямы почти 20-метровой глубины, пока не достигнут будет галечник, который, было известно по скважинам, показывал, что именно в этом месте пролегало русло древней реки. Дудки под землей соединяли между собой, и таким образом рабочие выгребали снизу весь галечник, поднимали его в ведрах на веревках наверх и промывали на бутаре (специальном приспособлении для промывки золота). Надо сказать, что мы, девочки, почувствовали, что такое «золотая лихорадка». Мы до прихода рабочих рано вставали, сами промывали галечник, который накануне был вынут с глубины, собирали золото и отдавали рабочим, которые его сдавали начальству. Особенно, конечно, запомнился первый золотой кусочек величиной с ноготь, такой окатанный, ровненький, блестящий. Это была победа Евгении Марковны как ученого. Значит, ее предположения правильны: мы имеем дело с погребенными древними долинами, в которых можно искать золото. Когда мы вернулись в Москву, даже нас, студентов, премировали. <...> Перед концом сезона был сабантуй. Торжество было отменное, приехало начальство из Семипалатинска. Бишбармак и прочие угощения... Во главе стола сидели Евгения Марковна и начальник прииска. По столу пошли две чаши: одна была наполнена так называемой сурпой, из нее начал пить сам начальник, а потом к ней прикладывались все по очереди казахи. Для нас была другая



В экспедиции на Иссык-Куле. 40-е годы.

чаша супы, к которой сначала приложилась Евгения Марковна, а потом и мы. Казашки стояли за нашими спинами и получали куски мяса от своих мужей. За стол им садиться не полагалось. Ели руками, все были в сале. <...>

На следующее лето нас Евгения Марковна трюх взяла снова, повысив наш статус. На этот раз мы уже поехали начальниками трех отрядов: Шура Загорская (ее почему-то все звали Бэби), Таня Кричевская и я. В Семипалатинске, где формировались наши отряды, завхоз экспедиции, вручая нам по лошади с телегой и буровым инструментом, предупредил, что, если волки сожрут наших лошадей, мы сядем в тюрьму не менее чем на 10 лет. Дали нам и по конюху, и по два рабочих и еще по поварихе. Так мы и поехали вглубь Казахстана, в восточную его часть. Скажу сразу, что в качестве конюха мне достался Гоша, паренек 13 лет, который в лучшем случае мог напоить лошадь, пустить ее на траву. Но чтобы смотреть за ней по ночам, речи быть не могло. Поэтому я, в сущности, не смыкала глаз, иногда меня сменяли рабочие, видя, как я боюсь тюрьмы. А волков действительно было много. И я прекрасно помню, как они сопровождали нас, когда уже в темноте возвращались в лагерь. Огоньки светящихся их глаз я до сих пор помню. Мы на телеге жгли газеты, и тогда они отступали на несколько шагов, но потом опять приближались. Одна ночь мне запомнилась тем, что волки, их было несколько штук, сидели на крутом берегу

долины небольшой речки и внимательно следили, что делалось в лагере, раскинувшемся у воды. Костер горел всю ночь, поэтому они к лагерю не подходили и лошадь не тронули (она была привязана к палатке). А один раз мы наблюдали, как целая громадная стая волков промчалась мимо нас, буривших скважину. Похоже было, что там была облава на них, поэтому они нас и не тронули. Облавы были частыми. <...>

Работы наши и на этот раз дали хорошие результаты. По этим исследованиям я написала сначала курсовую работу, а потом дипломную и получила «отлично». Но это уже другая тема.

Хотя нет, еще не написала, как в отряде Шуры студентка Фрида была укушена змеей. Она шла в маршруте вместе с Шурой (за ней), причем была в брюках, шерстяных носках и высоких ботинках. Шура же шла в тапочках на босу ногу. Казалось бы, змее было просто укусить Шуру. Но нет, она нашла место между брючиной и носком и ужалила Фриду. Нога стала быстро пухнуть, посинела. Фрида не могла двинуться с места от боли. Пришлось Шуре идти в деревню искать лошадь с телегой. Местные жители принимали горячее участие в этом несчастье. Шуру успокаивали: если до захода солнца не умрет, жить будет. Напоили ее молоком (заставили выпить 5 литров, после чего она больше в жизни молока никогда не пила). Жива осталась, и мы с Шурой положили ее в больницу в г.Казан-Чункур, который был на территории, где работала я. Шура уехала в свой район, а мне осталась Фрида. Врачи не знали, что с ней делать. Мне это показалось странным: ведь змей там было много, и Фрида была не одна укушенная. Но они то прикладывали ей холодные примочки, то горячие, то чем-то мазали, а опухоль все росла, и Фрида была накануне потери сознания. Мне местные жители, которые лежали в той же палате, посоветовали пойти к пожилой женщине, которая жила в Казан-Чункуре и умела заговаривать укусы змей. У меня не было выхода, и я пошла. Договорилась и старушка пришла. Всех из палаты выгнала (благо все были ходячие) и принялась за дело. Мы потом спрашивали у Фриды, что она делала. Сказала, что все время что-то шептала, но одновременно делала массаж, судя по всему, по направлению сосудов. Просидела она долго. Но на следующий день опухоль быстро стала сокращаться и к вечеру спала совсем. Врачи не могли понять, почему. Через несколько дней Фрида уже ходила и скоро выписалась. Что это было, не знаю. Но Фрида была спасена и продолжала работать.

<...> На второй год, когда мы поехали уже начальниками отрядов, Евгения Марковна предложила мне и Максиму Лопатникову поехать с ней на месторождение Хипарионов в Павлодаре. Ехали мы сначала всей партией, а потом мы втроем направлялись в Павлодар, а все остальные продолжали путь до Семипалатинска. В Павлодаре мы сразу добрались до совершенно удивительных обнаже-



Л.С.Кишкин на Огоньке.

ний крутого склона правого берега долины Иртыша: в красных глинах сплошные кости древних лошадей. Это было запомнившееся кладбище, где можно было увидеть и кости черепов, ног, скелеты крупных лошадей. Такого количества древней фауны мне не приходилось нигде видеть. Если я не ошибаюсь, они жили в третичное время, а на предгорном Алтае тоже были определены породы красных глин третичного возраста. Поэтому важно было изучить павлодарские разрезы. Пробывали там два или три дня, набрали образцов и на самолете «У-2» вернулись в Семипалатинск, где уже нас ждали другие сотрудники партии. Для меня полет был просто ужасным. Прежде всего я обратила внимание, что в кабине были широкие щели, через которые можно было видеть землю. Летели мы не очень высоко, и все-таки меня очень скоро укачало и начало рвать. Пилот увидел это через маленькое окошечко и сразу опустил так, что мне казалось, вот-вот зацепим за землю. Когда мне становилось лучше, пилот вновь поднимался выше, а мне сразу становилось опять плохо. Он снова спускался. Перед отлетом я его спросила, выдержит ли такая кабина трех человек? Он, посмеяв-

шись, ответил в том духе, что если не развалится, то долетим. Мол, мотор хороший. Мне, конечно, было бы интересно посмотреть на степь, над которой мы пролетали, и на рельеф — маленькие и большие сопки, но мне было не до того. Даже позже, когда мне приходилось заниматься аэро съемкой в Сибири, я так и не смогла привыкнуть к самолетам и могла вытерпеть не более 20 минут, после чего приходилось приземляться (летала с соленым огурцом, но и он плохо помогал). <...>

Как «понес» Огонек

<...> В Сибири мы часто ездили в маршруты на машине, и Яша, мой начальник, научил меня управлять машиной «ГАЗ-51». Но все же больше мы ездили верхом. Вспоминаю случай со мной, когда Лева был с нами. Дело клонилось к вечеру, и я должна была уже вернуться из маршрута. Как он мне рассказывал, он лежал за палаткой и читал. <...> В это время в лагерь ворвался мой конь Огонек весь в мыле. Меня на нем нет. Но в лагере не взволновались, поскольку мой молоток был в сед-

ле. Такое случалось: пока замешкаешься, лошадь поворачивается и рысцой несется домой без всадника. Но Лева взволновался, сел на Огонька и поехал меня искать. В это время меня подобрал на дороге литовец водовоз... пришел в ужас от моего вида и повез в лагерь. А между тем со мной произошло вот что. Все лето я работала на Огоньке, мы сдружились, он меня прекрасно слушался, я его пускала на колхозные поля овса и, когда звала, он послушно возвращался. Но тут начальник партии попросил у меня взять Огонька для многодневного маршрута, в котором участвовали и наши студенты. Конечно, я дала согласие. Через несколько дней ребята вернулись, но Огонька нельзя было узнать. Он дрожал все время, вздрагивал и не давал на себя садиться. Оказывается, группа попала в засаду — в лесу на них выгнали волков во время отлова. Прошло несколько дней, пока я коня немного успокоила, и, наконец, мне показалось, что он обо всем забыл. В тот день, о котором пишу, все было в маршруте спокойно, Огонек по-прежнему меня слушался, и я полностью ему поверила. Возвращалась домой, сидела в седле, бросила повод и записывала в книжку последнюю поставленную на карту так называемую описательную точку. В этот момент я успела увидеть, что посреди скошенного поля, по которому мы шли шагом, вдруг оказался высокий стебель, от ветра колыхнувшийся. И тут Огонек шархнул в сторону, я выпала из седла, а нога одна застряла в стремях, и Огонек понес меня галопом по стерне. Я лежала на спине и вся кожа со спины была содрана, а перед глазами мелькали копыта, которыми он бил по моим ногам. Мне стало страшно, что он заденет голову, и я повернулась на живот, чтобы не видеть этих копыт. Потом я ничего не помню.

Очнулась вся скрюченная, лежащая на земле, никого вокруг... С трудом рукой прощупала голову — вроде бы все на месте и даже что-то соображаю. Стала вспоминать, что же случилось. Да, я ведь в руках держала карту, записную книжку, а их нет. За потерю секретной карты дали бы мне не менее 10 лет тюрьмы, это в лучшем случае. Со страха перед такой возможностью я с трудом распрямилась (почему-то ноги у меня были закинута за голову, поэтому было очень трудно все «распутать») и, когда встала, почувствовала, что одна нога короче другой. Оказалось, что у той ноги, которая застряла в стремях, оторвалась подошва, и я таким образом была спасена. Но страх перед возможной тюрьмой заставил меня через силу пойти назад по следам Огонька, и примерно через 100 м я нашла и карту, и записную книжку. И поняла, что последние 100 м меня Огонек уже тащил без сознания. Живот и спина были все в земле, одежда разорвана, поэтому я испугала водовоза, и он все же помог мне. Но скоро по дороге примчался Лева, нас встретил, пересадил меня на Огонька и под уздцы довел до лагеря. А там уж

Лева меня «лечил» по-своему: промыл от земли спину и живот, несмотря на то, что кожа была содрана, залил, буквально залил меня йодом. Боже, как я орала... Даже сейчас, вспоминая этот ужас, у меня мурашки бегут по спине... Потом меня возили в больницу, переломов не было, и то хорошо. Только на ногах были сине-красные громадные култышки. Никогда не думала, что на кости могут из ничего появиться такие здоровые «опухоли». Постепенно все заросло, и я продолжала работать. Правда, на лошадь уже больше не садилась.

Сель на Украине

Я всю жизнь помнила и помню рассказ мамочки о том, как она в одной из экспедиций залезла в глубокую яму, где добывали для строительства песок — ей надо было взять образцы и зарисовать характер слоистости песка. Когда она все сделала и вылезла, на ее глазах яма вся завалилась. Если бы она промедлила еще секунду, она была бы погребена. <...>

<...> Расскажу, как я чуть было не погибла от селя... на Украине. Работали мы тогда по берегам низовья Днестра, Ингульца, Ингула и Южного Буга. В тот день у меня был пеший маршрут западнее города Берислава. Мне надо было описать весь разрез отложений, начиная от понта и более древних. Параллельно долине Днестра располагалась древняя балка с очень пологими склонами. Однако тот склон, который примыкал к водоразделу Днестра, был прорезан глубочайшими оврагами, в обрывистых склонах которых прекрасно можно было проследить всю смену отложений, взять образцы с фауной, которой изобиловали известняки. И я пошла снизу вверх, радуясь такому интересному маршруту. Дошла до самого верха, где овраг врезается своей вершиной в водораздел. В этот момент я услышала шум дождя. Надо сказать, что водораздел представлял собой громадную пашню, всю распаханную. Мне не захотелось мокнуть, и я спряталась от дождя между двумя торчащими большими глыбами известняка почти в самой верхушке оврага. Действительно, вскоре дождь пошел, но очень скоро кончился, и я уже собралась вылезать, как снова услышала шум. Думала, что пересажу еще одну гучку. А это был уже не дождь, а земляная масса с водой, которая после даже маленького дождика ринулась в овраг. Ничего не подозревая, я решила переждать и ее. Но масса воды с землей все увеличивалась, и в вершине оврага, метрах в пяти от меня, появился настоящий грязевой водопад. Он все увеличивался, а я, глупая, думала, что он вот-вот кончится. Но когда брызги начали охватывать и те глыбы известняка, между которыми я сидела, скрючившись, я поняла, что надо вылезать, пока не поздно. Выпрямиться не смогла и вылезти — тоже. Но на мне сумка с секретной

картой. Что делать? Надо спасти ее. Хотела отстегнуть ремень и сумку бросить на другой склон — найдут сумку с картой и узнают, что я здесь погибла. Но я так была скрючена между плитами, что и отстегнуть сумку не смогла. В это время водопад из грязи уже заливал мои глыбы, где я пряталась. Надо было спасти себя. Что было дальше, я не помню. Только очнулась я на краю крутого склона, держась молотком за небольшой кустик у бровки. Сразу посмотрела налево — мои глыбы были залиты грязью, и водопад с шумом мчался вниз, увлекая и камни, которые вымывал из берегов оврага.

С трудом вылезла на водораздел, хотела встать и не смогла: ноги подкосились, и я упала в грязь. Долго лежала, съела весь завтрак, съела шоколад, который мы всегда на всякий случай носили с собой — ничего не помогло. Лежала долго. Уже и машина должна была прийти за нами, а мне еще предстояло долго идти к ней. Так и лежала. Ноги не шли. С трудом я все-таки наконец поднялась. Через силу начала двигать ногами, а они все взбрыкивали вперед выше головы. С трудом дошла до места встречи, меня очень долго ждали и начали беспокоиться. Сначала рассердились, что пришлось меня так долго ждать, но когда узнали, что случилось, радовались, что чудом осталась жива.

Кто бы мог подумать, что на равнинной Украине может произойти такое. У нас, молодых, опыта не было, но взрослые-то могли предупредить. Начальник партии был очень опытный геолог, а и он разводил руками. Сель в горах — это дело известное, там мы всегда начеку. А вот тут...

Месторождение груш

Теперь совсем из «другой оперы». <...> Было это в Крыму. Наша партия работала в западной части полуострова. Евпатория, Саки, Севастополь, Балаклава, Симеиз... Всю эту территорию я прошла своими ногами. Очередной лагерь расположился в долине р.Альма. Мне со студенткой Наташей предстоял маршрут по правому склону долины Альмы, вверх по течению. Шли пешком и, заходя в овраги, которые прорезали склон долины, описывали разрезы и брали образцы. Трудновато было, как помню, спускаться по склону довольно крутому. В одном овраге мы спустились на самое дно и увидели громадную кучу камней, закрытую ветками деревьев. Я трусиха и поэтому к этой куче даже не подошла. А Наташа заинтересовалась, что бы это могло быть?



В Пушкинском музее на презентации книги Л.С.Кишкина. 2009 г. Москва.

«Сооружение» не совсем обычное. А вдруг там змеи? Но храбрая Наташа легонько палкой стала ворошить ветки, потом камни и... о чудо! Внутри — громадная куча... груш! Еще немного зеленоватых, но груш — дюшес. Вот так месторождение! Нам уже было не до окончания маршрута. Сняли с себя все, что было можно, в одежку упаковали все груши, несли на палке, в рюкзаках, сумках... едва двигались, одетые как на пляже — в одних «пустычках». Вышли на дорогу и даже, не стесняясь, стали голосовать, так как пешком мы не дошли бы с таким грузом. Только один водитель остановился и спросил, что с нами случилось. Действительно, вид у нас был странный, но мы об этом не думали. Мы ему все рассказали, и он понял, что кто-то ночью украл груши из колхозного сада в долине р.Альма и спрятал их в овраге, чтобы потом за ними прийти. Но тут подвернулись мы с Наташей. Нам и в голову не пришло, что воровать нехорошо. Шофер нас довез до лагеря, и мы с ним, конечно, поделились. Привезли в лагерь всю ношу, разделили между всеми. В это время у нас был в партии мой папа, проверял работу нашей партии (он был консультантом в «Спецгео», где я работала после окончания университета...), он уже собирался уезжать. Вот он и повез в Москву целый чемодан груш и писал потом, что они созрели и были очень вкусными. ■

© Публикация и вступление М.Ю.Зубровой