

ПРИРОДА

7 04



В НОМЕРЕ:

3 ЛУЧ СВЕТА В ЦАРСТВЕ ЧАСТИЦ
К 100-летию со дня рождения П.А.Черенкова
Черенкова Е.П.

Заметки к семейной хронике (4)

Говорков Б.Б.

Вспоминая Павла Алексеевича Черенкова (10)

Лебедев А.Н.

Черенковское излучение в электродинамических структурах (14)

Денисов С.П.

Детекторы черенковского излучения (22)

Болотовский Б.М.

Физики и лирики (31)

35 Добровольский В.В.

Роль органического вещества почв в миграции тяжелых металлов

Значительная часть тяжелых металлов, концентрирующихся в биосфере, входит в состав водорастворимых комплексных органических соединений, которые представляют собой почвенные гумусовые кислоты.

Лекторий

40 Галактионов В.Г.

Происхождение специфических иммуноглобулинов

Сегодня очевидно, что появление множества специфических белков, защищающих организм от самых разных патогенных вторжений, имеет длительную историю. Изучение ее стало возможным благодаря успехам молекулярной биологии и генетики.

47 Кароль И.Л., Киселев А.А.

Атмосферный метан и глобальный климат

Научные сообщения

53 Басов И.А.

Поднятие Шатского: эхо важнейших событий мела и палеогена
198-й рейс «ДЖОИДЕС Резолюшн»

Вибе Д.З.

Розы в южном небе (79)

Звезда, пожирающая свои планеты (80)

55 Богданов В.И.

Судьба уровнемерных знаков Балтийско-Ладожского региона

Нанесенные на прибрежные скалы метки, от которых отмеряли уровень моря в былые времена, могут быть полезными и в современных метрологических исследованиях.

62 Журавлев А.Ю.

Среди рифов и мифов

Строить рифы, как выяснилось, способны многие организмы, а не только кораллы. В истории Земли одних рифостроителей сменяли другие, а устойчивость рифовой экосистемы зависела (и зависит) от того, насколько быстро она может восстановиться, если ее целостность нарушена внешними силами. Но своего прежнего облика система, подобно любой другой, никогда не приобретает.

69 Паевский В.А.

Трудная жизнь пернатых многоженцев

Мир птиц красочен и многолик; столь же разнообразно их поведение, особенно в брачный период. У пернатых нет нравственных запретов, все подчинено единственной цели — продолжению рода.

78

Архивные SMS-ки

«Не вижу в нем надобности для СССР...»

81

Новости науки

К Луне — с новым «мотором» (81). Продлена миссия «Улисса» (81). Будущее космического телескопа «Хаббл» (82). На Нептун пришло лето (82). Полярные сияния: взгляд изнутри (83). Яркие электронные эмиттеры на углеродных нанотрубках (83). Менять ли стеклянные очки на пластиковые? **Исаков Д.В.** (83). Перепись бенгальского тигра (84). Жизнь в озерах поддерживают наземные экосистемы. **Гиляров А.М.** (84). Вирус против жаб. **Семенов Д.В.** (85). Паго взят под надзор (86). Гляциогенные землетрясения (86). Динамика таяния льда в арктических морях (87). Потепление в высоких широтах (88). Немореходные динозавры (88). Очень древняя находка «современного» европейца (88). Пещера Ласко в опасности (89).

Коротко (39)

Рецензии

90 Малахов В.В.

Новая история «одного рода пресноводных полипов с руками в форме рогов»

91

Новые книги

В конце номера

93 Борисов В.П.

Токарные художества Петра Великого

CONTENTS:

3 A RAY OF LIGHT IN THE REALM OF PARTICLES

On the 100th Centennial of the Birth of P.A.Cherenkov

Cherenkova E.P.

Sketches for a Family Chronicle (4)

Govorkov B.B.

Reminiscences of Pavel Alekseevich Cherenkov (10)

Lebedev A.N.

Cherenkov Radiation in Electrodynamic Structures (14)

Denisov S.P.

Cherenkov Radiation Detectors (22)

Bolotovskiy B.M.

The Physicists and the Poets (31)

35 Dobrovolsky V.V.

The Role of Soil Organic Matter in the Migration of Heavy Metals

A significant proportion of heavy metals concentrated in the biosphere is incorporated in water-soluble organic complexes, which are soil humus acids.

Lectures

40 Galaktionov V.G.

The Origin of Specific Immunoglobulins

It is now obvious that the appearance of numerous specific proteins that protect the organism from a wide variety of pathogens has a long history. Its study has been made possible through the advances in molecular biology and genetics.

47 Karol I.L. and Kiselev A.A.

Atmospheric Methane and Global Climate

Scientific Communications

53 Basov I.A.

The Shatsky Rise: An Echo of the Major Events of the Cretaceous and Paleogene

198th Cruise of the JOIDES Resolution

Wiebe D.Z.

Roses in the Southern Sky (79)

A Star Devouring Its Planets (80)

55 Bogdanov V.I.

The Fate of Water-Level Marks in the Baltic-Ladoga Region

The marks made on coastal cliffs that were formerly used to reckon sea level may be useful in modern metrological studies.

62 Zhuravlev A.Yu.

Amid Reefs and Myths

In addition to corals, many organisms have been found capable of constructing reefs. The Earth's history records a succession of various reef builders, with the stability of a reef ecosystem depending on how rapidly it can restore itself if its integrity has been violated by external forces. However, like any other system, it can never regain its former appearance.

69 Paevsky V.A.

The Hard Life of Feathered Polygamists

The bird world is colorful and diverse. Its wide variety of behavior patterns is particularly evident during mating season. Free from moral restrictions, the feathered creatures are motivated solely by the need to propagate their species.

78

Archival SMSs

«I See no Need for It in the USSR»

81

Science News

Heading for the Moon with a New «Motor» (81). The Ulysses Mission Prolonged (81). The Future of the Hubble Space Telescope (82). Summertime on Neptune (82). Aurora: A Look from within (83). Bright Electrode Emitters Based on Carbon Nanotubes (83). Should One Switch from Glass to Plastic Spectacles? **Isakov D.V.** (83). A Census of Bengal Tigers (84). Life in Lakes Is Supported by Terrestrial Ecosystems. **Ghilyarov A.M.** (84). Virus versus Toads. **Semenov D.V.** (85). Pago Placed under Surveillance (86). Glaciogenic Earthquakes (86). Ice Melting Dynamics in the Arctic Seas (87). Warming in High Latitudes (88). Nonmarine Dinosaurs (88). An Ancient Find of a «Modern» European (88). The Lasco Cave in Jeopardy (89). *In Brief* (39)

Book Reviews

90 Malakhov V.V.

Modern History of «One Genus of Freshwater Polyps with Horn-Shaped Arms»

91

New Books

End of Issue

93 Borisov V.P.

Peter the Great's Lathe Work

ЛУЧ СВЕТА В ЦАРСТВЕ ЧАСТИЦ

К 100-летию со дня рождения П.А.Черенкова



Находясь в Париже, В.И.Вернадский в 1924 г. писал своему другу И.И.Петрункевичу: «Любопытны указания, которые я имею с разных сторон в области точного знания, на появление молодых талантов из народной среды. Может быть, в этом — главная возможность возрождения... Возрождение зависит от неизвестных нам законов появления больших личностей».

В том же 1924-м начался путь к известности парня из деревенской глубинки, выбравшего своей судьбой физику и ставшего спустя десятилетия лауреатом Нобелевской премии.

В 1934 г. П.А.Черенков (1904–1990), начав работать в ФИАНе под руководством С.И.Вавилова в качестве аспиранта, совершил открытие, сыгравшее важную роль в развитии эксперимента в физике элементарных частиц — обнаружил излучение света «быстрыми электронами» (т.е. электронами, имеющими скорости, превышающие скорость света в среде). Теоретическое объяснение его природы дали И.Е.Тамм и И.М.Франк, разделившие с П.А.Черенковым высшую в мире научную награду, присужденную в 1958 г. всем троим «за открытие и интерпретацию эффекта Черенкова». У нас чаще говорят «эффект Вавилова–Черенкова». Это восстанавливает справедливость по отношению к Вавилову как руководителю работы и ученому, сделавшему ряд важных предложений в ходе анализа обнаруженного излучения, но не умаляет заслуг Черенкова, которому судьба безошибочно доверила роль первооткрывателя. Павел Алексеевич обладал неповторимой совокупностью исключительно важных для экспериментатора качеств.

Открытие Черенкова довольно быстро обратило на себя внимание специалистов из разных стран, а когда началось стремительное развитие его практических приложений, прежде всего благодаря черенковским счетчикам элементарных частиц, его имя стало едва ли не самым часто упоминаемым в работах по экспериментальной физике.

Научная изоляция СССР помешала более раннему выдвижению Черенкова на соискание Нобелевской премии. Хотя теперь известно, что по меньшей мере одна такая попытка была. В 1952 г. кандидатуру Черенкова предлагал Леон Розенфельд, известный физик-теоретик, в то время профессор Манчестерского университета. При этом он отмечал трудности с представлением текстов работ, описывающих эффект Черенкова, и смог приложить только их список. Однако со временем положение изменилось. Наша страна и ее наука больше открылись миру. В 1958 г. П.А.Черенков, И.Е.Тамм и И.М.Франк стали первыми физиками нашей страны — лауреатами Нобелевской премии.

Хочется надеяться, что читателям очерков и статей, которые мы публикуем, будет интересен и эффект Черенкова, и феномен самого Черенкова. В заключение добавим, что с 1999 г. РАН присуждает премию им.П.А.Черенкова за выдающиеся достижения в экспериментальной физике высоких энергий.

Заметки к семейной хронике

Посвящаю памяти моего брата Алеши

Е.П.Черенкова,

*кандидат физико-математических наук
Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН
Москва*

В очерке об отце, Павле Алексеевиче Черенкове, можно было бы придерживаться сухих фактов. Надеюсь, неизбежные отклонения оживят ее.

В ленинградском общежитии Академии наук для аспирантов декабрьским вечером 30-го года за новогодним столом — хоть на столе и стояло четыре рюмки, — но собрались трое: Вера Зажурило, Павел Черенков, Андрей Пупыкин. Корни их знакомства вели в Воронежский университет. Павел с Андреем и одновременно учились в университете, и были земляками — родились и выросли в селе Новая Чигла, что в ста километрах от Воронежа. Вера училась в Воронежском университете на одном курсе и отделении с подругой Марией Путинцевой. Именно для Марии, невесты Павла, предназначалась четвертая рюмка.

Но в тот вечер ее не могло быть за их столом... Много событий стояло позади этого небольшого застолья в их еще молодой жизни. Радости и беды, везение и невезение, закономерности и случайности... Позади. А впереди...

Павел родился в самом начале XX в., 28 июля 1904 г. Отец его, Алексей Егорович, был по-крестьянски умелым и ловким

человеком. Вел вместе с женой домашнее хозяйство, держал дом-шестистенку, крупную и мелкую скотину, имел собственную продовольственную лавку, ездил в извоз за продуктами для своей торговли, плотничал, в период 1914—1917 гг. был мобилизован в армию и выслужил чин поручика. Семья жила небогато. Впрочем, село, расположенное в полосе черноземья, еще до 1861 г. — отмены крепостничества — считалось достаточно богатым. Жители его были государственными крестьянами, не знавшими больших поборов или притеснения со стороны властей. Позднее, когда в тех краях прошла железная дорога, расстояние до нее и связь были такими, что о городских новостях узнавали больше по слухам. Вместе с тем село было заметное — с заводами меринсовых овец, битюговых лошадей, сахарным и маслобойным.

О матери Павла Алексеевича, Марии Павловне Прытковой, известно немного. Она умерла, когда моему отцу было два года. Крестьянин не может жить без хозяйки в доме. Алексей Егорович женился. Рождались дети. При высокой детской смертности того времени выжили и выросли пятеро — Мария, Павел, Варвара (от первого брака), Екатерина и Татьяна (от второго). Мальчик оставался единствен-

ный. Позднее сестры вспоминали, что мачеха не была одинаково ровна со всеми детьми. У падчериц остались обиды на всю жизнь. Так же не хватало душевного тепла пасынку. Возможно, это наложило отпечаток на его характер. Мачеха прятала его зимнюю шапку, чтобы не ходил в школу, а занимался мужскими домашними делами. Приходилось иногда убежать без шапки.

Самым большим увлечением стали книги. В селе была библиотека — единственная на весь Бобровский уезд Воронежской губернии. (Это ли не везение?!) Чтение при отличной памяти дало мальчику настолько широкий кругозор, что его познаниям потом удивлялись его уже взрослые сотоварищи.

Из-за гражданской войны учеба прошла в два этапа. После окончания церковно-приходской школы, когда в селах и городах настали годы многократных фронтовых действий и вылазок банд, годы безвластия и неразберихи (голодное время!), Павел работал чернорабочим, конторщиком. Затем доучивался в школе-гимназии, переведенной в село из Боброва. Учителя отмечали его способности, прочили большое будущее.

После окончания в 1924 г. школы он поступил на физико-математическое отделение Воронежского университета. Сту-

денческое и преподавательское окружение, городская жизнь, по его словам, оставили самое яркое впечатление. Стипендия была небольшой, приходилось подрабатывать уроками, разгрузкой вагонов, в каникулы, во время наездов домой, — счетоводом на мельнице.

По окончании университета — преподавание в школах Козлова (Мичуринска). Сюда же на полтора года позже, в 1930 г., приехала воронежская выпускница литературного отделения Мария Путинцева. Здесь они познакомились, здесь начался их совместный дальнейший путь. Красивые, умные, начитанные, трудолюбивые, веселые, верящие в широкие горизонты, раскрывающиеся перед страной и молодежью. Летом по путевке они объехали Крым. Прочитав объявление в газете, Павел написал заявление о приеме в аспирантуру в ленинградский Физико-математический институт Академии наук, прошел собеседование и был принят.

Прекрасное будущее, которое вскоре должно было наступить, встречало на своем пути самые неожиданные и даже странные события и препятствия. Когда до села Новая Чигла дошла коллективизация, Алексея Егоровича как зажиточного крестьянина лишили избирательных прав и осудили на два года высылки. В этих черных списках оказался было и Павел. Но в ту пору он не был постоянным жителем села, его фамилию зачеркнули. Можно сказать, повезло.

Отец Марии Путинцевой, профессор-филолог Воронежского университета, краевед и этнограф, был в ноябре 1930 г. арестован по «делу краеведов» и осужден на 5 лет лагерей. Это большой судебный процесс, по которому проходило более 90 человек.

С осени 1930 г., после зачисления в аспирантуру, Павел стал жить в Ленинграде, а Мария смогла приехать к нему только после окончания процесса, во время которого оставалась ря-

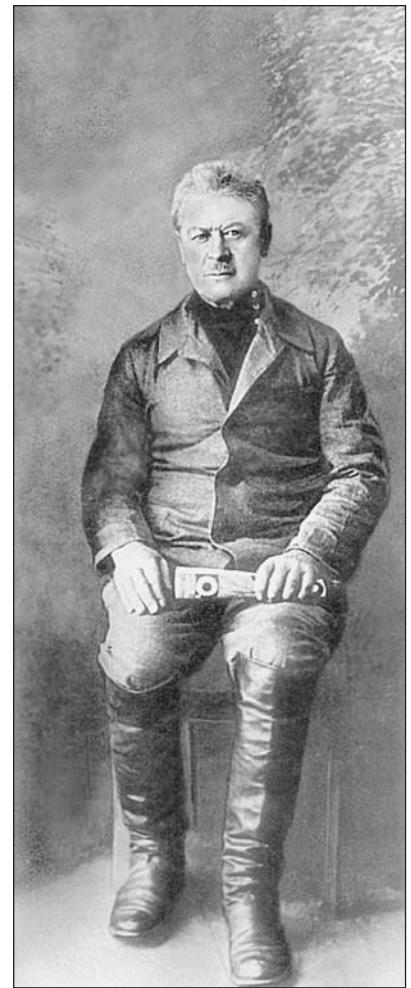
дом с матерью; 30 апреля 1931 г. они зарегистрировали брак.

Последовала проблема: устроиться с жильем в общежитии, добиваться отдельной комнаты — не только для себя и жены. Там же как член семьи поселилась младшая из папиных сестер, Татьяна. (Из-за трудностей деревенской жизни отец забрал ее к себе, еще работая в Козлове.) После того, как моего дедушку Алексея Михайловича отправили в ссылку, в ту же комнату общежития перебралась и бабушка Мария Михайловна — ей некуда было больше деться. Осенью 32-го в семье родился первенец — Алексей, в первые годы жизни очень болезненный ребенок. (Спустя четыре года, уже в Москве, появилась на свет дочь Елена.)

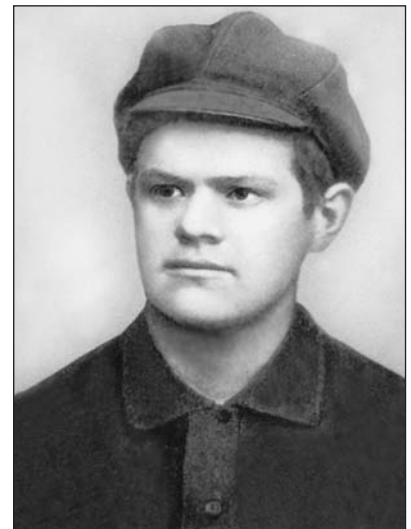
Мария то и дело оставалась без работы. С одеждой было трудно, и все-таки зимнее пальто Павла Алексеевича отправили Алексею Михайловичу. Хлеб, сушившийся на сухари для пересылки в лагерь, покупали на карточки матери Веры Зажурило — той самой, которая встречала с Павлом и Андреем Новый, 1931 год. Примерно здесь наш рассказ перешагнул время новогоднего застолья, с которого он начался.

Что же происходило далее?

Светлой частью того периода стала сама аспирантура. С 1932 г. в аспирантуре Академии началось оживление. Сергей Иванович Вавилов взял к себе трех аспирантов, среди них оказался и П.А.Черенков. Роль Вавилова в своей научной судьбе отец оценивал чрезвычайно высоко. Сергей Иванович предложил каждому выбрать одну из трех тем. Самая простенькая, мало привлекательная, не обещающая интересных выводов тема — по исследованию люминесценции — досталась Павлу, по-видимому, как самому провинциальному из аспирантов. Что бы позже ни говорили участники и современники научных и околонуточных событий, развивавшихся вокруг одной из аспирантских тем, распределение их было не столько



Алексей Егорович Черенков.
Новая Чигла. 20-е годы.



Павел после окончания школы.
Новая Чигла. 1924 г.



С сестрой Татьяной (слева) и невестой Марией Путинцевой (стоит). Козлов. 1930 г.



С дочерью Еленой. 1940 г.



С Марией Алексеевной 30 лет спустя.

везением для Павла Алексеевича, сколько просчетом всех остальных — тех, кто не взялся за аспирантскую тему Черенкова или не присоединился к теоретическим поискам позднее.

Немного позже, в 1934 г., Институт разделился на Математический и Физический. По воспоминаниям сотрудников довоенного Физического института (ФИАН), в нем хранилась особая атмосфера дружелюбия, глубокого интереса к физике, светлой веры в успехи научных трудов. В немалой степени это определялось личностью директора, С.И.Вавилова — глубоко интеллигентного и доброжелательного человека. В 1934 г. в Москву

переехала Академия наук, а вместе с ней и Физический институт с сотрудниками.

Уже не раз вспоминали о том, что перед началом опыта по люминесценции Павлу Алексеевичу приходилось подолгу сидеть в комнате без освещения, чтобы глаз адаптировался к полной темноте. Поговаривали, будто аспирант Вавилова занимается спиритизмом. Кое-кто из сильных физиков считал эти опыты ненужными или вовсе чужью.

Аспирант Черенков, при всем своем усердии, точности в исполнении экспериментов, при особом внимании к каждой детали опытов, огромной ответственности за свою работу, испытывал некоторое недоумение:

наблюдению люминесценции мешало непонятное добавочное свечение, какой-то фон, избавиться от которого не удавалось никаким способом. Мудрость Вавилова не позволяла сомневаться в том, что занятия «спиритизмом» имеют большой смысл. Однако аспиранту требовалось немало воли и старания, чтобы не потерять веры в свои силы.

В ходе работы по основной теме Павел Алексеевич одновременно изучал и мешающий фон, то голубоватое свечение, которое — вначале к его большой досаде — отвлекало от главного. Защита кандидатской благополучно прошла в 1935 г., но исследования фонового свечения продолжались. Опыты проводи-



Семья Черенковых в Голицыно. 1948 г.

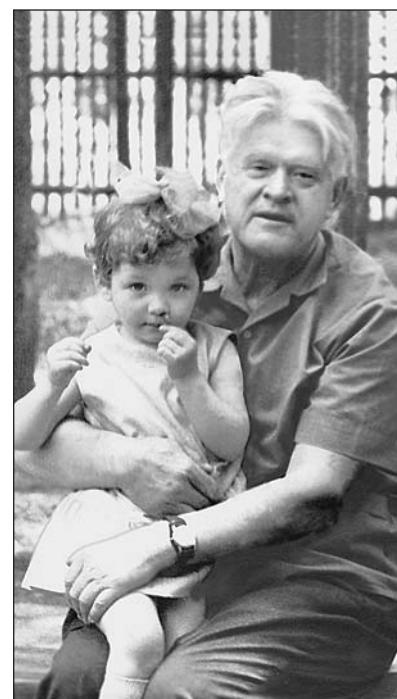
лись с помощью простейших инструментов — в рамках технических возможностей первой половины XX в. Свойства неизвестного излучения, зафиксированные именно в таких экспериментах, оказались решающими для истинного понимания его природы.

Первая публикация Черенкова по новому виду излучения относится к 1934 г. Одновременно была опубликована статья Вавилова с первоначальной попыткой дать теоретическое объяснение эффекта, принципиально важные свойства которого были обнаружены в экспериментах. Немного позже Сергей Иванович посоветовал И.М.Франку и И.Е.Тамму заинтересоваться таинственным излучением и подсказал круг литературы, которая помогла бы найти ответ. Черенковым был выполнен тот объем экспериментов, который

давал полную возможность теоретического описания излучения, а Франк и Тамм в 1937 г. на основе классической электродинамики создали теорию излучения.

Важно также подчеркнуть, что в 1937 г. Черенков опубликовал статью, в которой была выдвинута идея использования излучения для измерения скоростей быстрых электронов. Это позднее привело к созданию многочисленных научных приборов — разнообразных детекторов, названных его именем (о некоторых из них говорят «черенкатор»). Продолжив опыты, Павел Алексеевич подтвердил количественную сторону теории Франка и Тамма. Исследование излучения велось им до 1944 г.

Сначала открытие встретило недоверие. Статью Черенкова не приняли в журнале «Nature»,



С внучкой Татьяной. 1977 г.



На обеде в ратуше по поводу вручения Нобелевской премии. Слева — с королем Швеции, Густавом VI Адольфом; справа — с принцессой Сибиллой. Стокгольм. 1958 г.

но затем через пару месяцев ее благополучно опубликовал журнал «The Physical Review». Тем не менее Д.В.Коллинз и В.Д.Рейлинг в 1938 г. и Г.О.Виков и Д.Е.Гендерсон в 1943 г. сумели повторить эксперимент. Коллинз и Рейлинг впервые использовали термин «Cherenkov radiation». В тексте о присуждении Нобелевской премии открытие получило название «эффект Черенкова» и так вошло в мировую литературу и повседневную практику.

Отступлю от научной стороны жизни отца. Будет нарушена и хронология событий. В 1932 г. выпустили из лагеря Алексея Михайловича Путинцева. Профессор-филолог вынужден был вместе с супругой скитаться по городам России в поисках работы и хоть какого-нибудь жилья, пусть за печкой. В лагере он потерял здоровье, и весной 1937 г. его не стало. Мама любила своего отца невероятно сильно, и эта потеря отразилась на ее здоровье. Летом 1937 г. арестовывают его брата, священника Михаила Михайловича.

В те же 30-е вернулся из ссылки Алексей Егорович Черенков и некоторое время работал на стройке московского метро. В самом конце 1937 г. его снова арестовывают — по разнарядке. Так рассказал односельчанин, схваченный вместе с ним — тому удалось бежать. Как теперь известно из архивных документов, мой родной дедушка и двоюродный были судимы «тройками», а это, как правило, означало расстрел. На фоне таких семейных событий шла научная работа Павла Алексеевича перед войной.

С началом войны Физический институт довольно быстро эвакуировали в Казань. Нашу семью разместили как подселенцев в комнате довольно большого одноэтажного дома на Большой Красной улице, с русской печкой и «удобствами» на улице. Мы прожили там до весны 1943 г. Вначале с питанием дело обстояло неплохо. Позже стали жить голодно. Иногда, особенно к вечеру, была бы рада самой маленькой крошке хлеба. Как-то

фиановцы отправились в провинцию за едой, но вернулись без какой-либо «добычи».

Отец время от времени уезжал в командировки, в Подмосковье участвовал в работах оборонного значения. Мама, как и в Москве, работала в Воениздате, затем на картонажной фабрике клеила коробочки для патронов. Самая тяжелая работа началась позже — сопровождающим продуктовые грузы. Помню, домой она приходила в ватнике и ватных брюках. Очень уставала. Была у нее какая-то многодневная поездка на товарной платформе в небольшом домике с печкой, и особая проблема заключалась в том, чтобы достать дрова и «отovarить» карточки. Семьи научных сотрудников подкармливались огородами, участки раздавали во время войны и в Казани и позже — в Москве.

Возвращение из эвакуации было радостным — домой, в нашу «комфортабельную» коммунальную квартиру. В 1934 г., при переезде из Ленинграда, родители получили две комнаты в большой коммунальной квартире на 2-й Тверской-Ямской, вблизи площади Маяковского (ныне — Тверская). Такие условия считались неплохими. Но по возвращении из Казани пришлось столкнуться с тем, что в московском доме отопительная система не работает. Сооружали «буржуйки», с выводом трубы через форточку. Из мест стыковки труб капал деготь. Таков был быт почти всего города.

В те времена, впрочем, как и в Казани, научные сотрудники имели льготные карточки — на большее число и больший ассортимент продуктов и промтоваров. Получали их в так называемых «лимитных» магазинах. Относительные преимущества создавали чувство «обеспеченности». Однако помню свои дырявые валенки и штопаное зимнее пальто. Для Алеши мама перешивала пальто из дедушкиных вещей. Постепенно тяготы жизни отступали.

В послевоенные годы папина работа, связанная с ускорителями элементарных частиц, была переведена на «закрытую» тематику. В тот же период он преподавал в институтах: сначала в Энергетическом (МЭИ), затем в Инженерно-физическом (МИФИ). Годы шли. Прибавлялись папины награды. Ядерной тематике придавалось особое значение. Наградками отмечались как отдельные успехи, так и юбилеи.

Особенно радостным моментом осенью 1958 г. было присуждение отцу Нобелевской премии (вместе с И.М.Франком и И.Е.Таммом). В стране недавно уже был прецедент — Нобелевскую премию получил академик Н.Н.Семенов. В ту пору эта награда, имеющая высший международный статус, казалась сказкой. В том же 1958 г. премия по литературе была присуждена замечательному поэту Борису Леонидовичу Пастернаку, но он был вынужден от нее отказаться.

Сборы для поездки в Стокгольм по совету сотрудников дипломатического аппарата начались с консультаций. В Москве находилась жена советского посла в Швеции Эра Калмановна Гусева. Она подробно рассказала маме о требованиях к одежде. Мужчинам — фраки, женщинам — платья определенной длины, обязательно с декольте, украшения только натуральные, никаких мехов, даже самых дорогих. Платья не должны повторяться ни на одном приеме. Рассказала о манере держаться в зависимости от титула особы визави. Несмотря на тщательное обсуждение всех условностей, на один из светских приемов мама пришла — по незнанию — без шляпки. Великосветские хозяева и благородные гости, конечно, сделали вид, что этого не заметили.

По правилам Нобелевского фонда лауреаты могут пригласить с собой на празднества родственников и друзей без ограничения их количества. Но мы уже знали, что по неписаным законам того времени даже

самые близкие родственники поехать не смогут (ах, как нам этого хотелось!).

С нашими тремя Нобелевскими лауреатами смогла поехать только моя мама. На аэродроме их встречал советский посол и представители Нобелевского комитета. Поселили в Гранд-отеле. Вечером все четверо вышли прогуляться по городу. В вестибюле к ним подошел фоторепортер и попросил разрешения сопровождать их во время прогулки. Так он получил дополнительную, «эксклюзивную» информацию, а мои родители — несколько фотографий, прекрасного качества и интересных. Нобелевские торжества приходятся на пред Рождественские дни. Витрины магазинов выглядели особенно празднично. Теперь многим трудно представить себе, насколько однообразны и убоги были наши витрины 58-го года. Мама оценила ту жизнь, что увидела в Швеции, так: «Все, как у нас до революции».

Каждому из лауреатов полагался ежедневный гид. Павлу Алексеевичу и Марии Алексеевне помогали разобраться во всех случайных стокгольмских проблемах и сам гид, и его невеста. Торжественную картину вручения премии королем Швеции дополняло присутствие королевской семьи: королевы, ее невестки и трех красивых внучек-принцесс. Принц, современный король, в то время не был на празднестве, потому что ему было только 11 лет*.

Я не ставила задачи описать полный научный путь Павла Алексеевича. В последующие годы после 58-го его проблемами были научные и научно-организационные. От работ по созданию ускорителей элементарных частиц его отвлекали многочисленные поездки: на научные

конференции, совещания научно-организационного характера, по делам Комитета защиты мира, юбилейного характера. Особенно интересными для папы оказались юбилейные торжества, посвященные 350-летию публикации трудов Галилея «Диалоги о двух главнейших системах мира — птоломеевой и коперниковой» и 150-летию со дня рождения Нобеля.

Хотелось добавить, что бесконечно любознательная натура отца влекла его в походы, притягивала к чтению книг самых разнообразных, последние годы — к живописи и музыке. Он всегда предпочитал активный отдых. Зимой — лыжи, летом — теннис и прогулки. Теннис был его большим увлечением. Он любил участвовать в соревнованиях, любил натягивать струны на ракетки. Очень любил фотографию — «щелкать» аппаратом и самому печатать снимки. Он оставил огромное количество фотографий (к сожалению, на них мало изображений его самого). На снимках мелькают какие-то «незнакомые» козы, коты, ослики. Он любил животных, любил жизнь, любил людей, хотя не всегда правильно в них ориентировался.

Для него мир всегда был так же необычайно интересен, как в далеком детстве, когда он прикоснулся языком к заиндевевшей ручке двери — это был его первый «научный» эксперимент. Он всегда вглядывался в суть вещей, событий, явлений — как и положено естествоиспытателю. Старался самостоятельно находить ответы, преодолевать встречающиеся трудности.

Последняя его потеря, которую он преодолел с большим трудом, была преждевременная кончина Марии Алексеевны. Оставшиеся годы он радовался внукам — Тане и Андрюше. О последних днях своего отца он так никогда и не узнал. Трудно рассудить, чего в его жизни было больше — удач, невезения, счастья... Но я твердо знаю, чего было много — преодоления. ■

* В нашем журнале неоднократно описывались торжества, связанные с вручением Нобелевской премии. См., напр.: Тамм И.Е. О торжественной церемонии в Швеции // Природа. 1995. №7. С.99—102; Блах А.М. Нобелевский фестиваль 1996 года // Природа. 1997. №5. С.81—89.

Вспоминая Павла Алексеевича Черенкова

Б.Б.Говорков,

*доктор физико-математических наук
Физический институт им.П.Н.Лебедева
Москва*

Начиная со студенческих лет, я не перестаю восхищаться научным подвигом академика П.А.Черенкова, выдающегося физика-экспериментатора, который открыл удивительной красоты явление — излучение заряженной частицы, движущейся равномерно и прямолинейно в оптически прозрачной среде со скоростью, больше фазовой скорости света в ней [1]. Более того, Черенков установил и скрупулезно исследовал все основные свойства нового излучения: универсальность, спектр, поляризацию и, наконец, самое главное свойство нового излучения — направленность — концентрацию излучения в узком конусе с осью в направлении движения заряженной частицы с углом при вершине конуса, описываемым знаменитой формулой:

$$\cos\theta = \frac{1}{\beta n(\omega)}.$$

Здесь β — скорость частицы в единицах скорости света в пустоте (c), n — показатель преломления среды, зависящий от частоты свечения.

Следует особо выделить важную слагающую открытия Черенкова — его прямое указание на возможное применение нового вида излучения как метода измерения скоростей частиц высоких энергий по порогу излучения [2].

Все опыты Черенкова, проводившиеся с участием его руководителя академика С.И.Вавилова, отличались удивительной простотой и изяществом, ясностью цели и последовательностью. В большей части экспериментов применялся разработанный Вавиловым с учениками метод использования человеческого глаза для количественных измерений световых потоков по порогу зрения [3]. Метод требовал длительной настройки глаза в абсолютной темноте, тщательной подготовки всех деталей установки, которую Черенков осуществлял всегда самостоятельно.

Следует отметить, что впервые использовать человеческий глаз в качестве надежного инструмента для измерения интенсивности светового потока предложил известный естествоиспытатель А.Лавуазье. В 1763 г. тогда еще юный Лавуазье, которому был 21 год, принял участие в конкурсе, объявленном Королевской Академией наук, на отыскание лучшего способа освещения Парижа. Он сопоставлял освещенности, даваемые различными типами фонарей (масляными и со свечами, с рефлекторами и без них) при поисках оптимального варианта освещения города. При этом свои измерения Лавуазье проводил в темной комнате, обитой черным сукном. На своем собственном опыте он убедился, что человеческий глаз решает задачу оценки освещенности наилучшим образом. Предложения

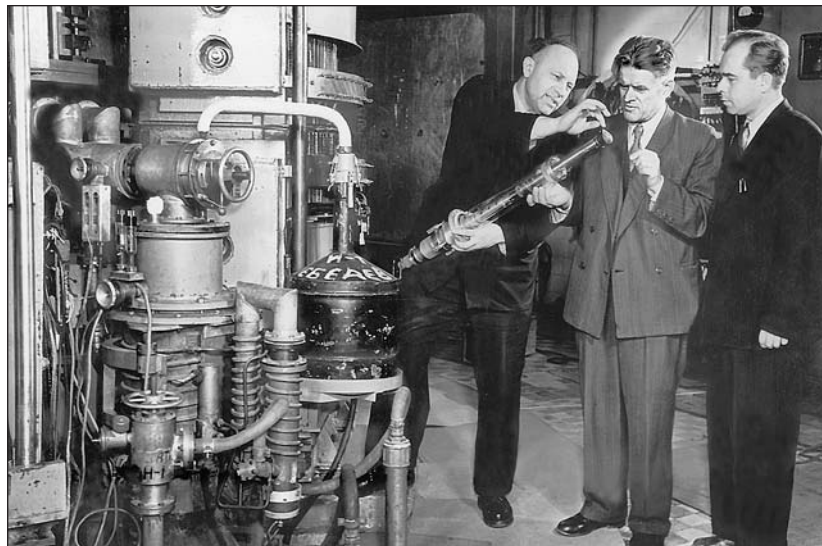
Лавуазье были изложены в капитальном труде и отмечены золотой медалью Королевской Академии наук в 1766 г.

Мне посчастливилось всю жизнь проработать в лаборатории Черенкова. Поэтому многие детали исследований, приведших к открытию эффекта Черенкова, мне стали известными из уст самого Павла Алексеевича. Так, на мой вопрос, как ему удалось впервые увидеть предельно слабое новое излучение, он ответил, что впервые наблюдал новое свечение при проведении фоновых экспериментов. Вавилов поставил перед ним, тогда аспирантом, задачу изучить люминесценцию растворов ураниловых солей при облучении их γ -квантами от радиоактивного радиевого источника. Проводя измерения люминесценции упомянутых растворов, Черенков решил посмотреть, не влияют ли на люминесценцию стенки стеклянного стаканчика и сам чистый растворитель — серная кислота. Павел Алексеевич рассказывал, что, заметив свечение стаканчика с чистым растворителем, он очень удивился. Тогда он направился на склад Физического института им.П.Н.Лебедева (ФИАН) и собрал там все прозрачные жидкости. Вернувшись в лабораторию, он повторил опыты по наблюдению свечения с другими чистыми веществами. Все жидкости светились! Причем все примерно с равной интенсивностью ($\pm 15\%$).

Попытки потушить свечение по методам, разработанным Вавиловым с учениками (использование гасящих добавок, нагрев жидкостей и др.), оказались безуспешными — все жидкости светились и все тут! При очередной встрече со своим руководителем Павел Алексеевич подробно рассказал о неожиданном результате измерений фона. В итоге обсуждения появились новые планы и идеи в постановке опытов, доказывающих нелюминесцентный характер излучения, в частности выясняющих роль электронов в получении нового излучения. Так рассказывал Павел Алексеевич о своем первом наблюдении излучения, которое потом получило наименование эффекта Вавилова—Черенкова.

Первая попытка объяснения природы нового излучения была предпринята самим Вавиловым. Исходя из измеренных характеристик свечения, наблюдавшегося Черенковым, Сергей Иванович показал, что наблюдаемый эффект вообще не может быть каким-либо видом люминесценции, так как время его высвечивания $< 10^{-10}$ с, и предположил, что новое свечение есть тормозное излучение электронов в растворителях, возникающих при комптоновском рассеянии фотонов от радиоактивного источника.

Павел Алексеевич мне также рассказывал, как он подготовил к печати первую статью от имени двух авторов (Вавилова и Черенкова), которая содержала и описание результатов проведенных опытов, и возможное теоретическое объяснение природы нового свечения. Черенков рассматривал эту статью как совместную работу со своим руководителем. Сергей Иванович одобрил содержание статьи, но предложил разделить ее на две части: экспериментальную — автор Черенков и теоретическую — автор Вавилов. Это и было реализовано. Во втором томе «Докладов Академии наук» за 1934 г. обе работы были напечатаны одна за другой.



Обсуждение деталей эксперимента около синхротрона С-25. Москва. 1958 г. Слева от Павла Алексеевича — А.Я.Беляк, справа — Ю.М.Адо.



С лауреатами Государственной премии СССР, сотрудниками лаборатории фотомезонных процессов ФИАН. Троицк. 1973 г. Сидят (слева направо): С.П.Харламов, П.П.Черенков, А.Н.Тавхелидзе (ИЯИ), Б.Б.Говорков. Стоят: А.И.Лебедев, И.Е.Тамм, А.С.Белоусов, М.И.Адамович.

Как же встретила научная общественность открытие нового вида излучения? В течение длительного времени экспериментальные результаты Вавилова и Черенкова вызывали недоверие. В докладе на юбилейной конференции 1984 г., приуроченной к 50-летию открытия излучения, Павел Алексеевич вспоминал, что его эксперимен-

ты подчас квалифицировались как занятия спиритизмом в темной комнате.

Известно, что в тот начальный период один из ведущих европейских журналов отказался от итоговой статьи по новому излучению без какого-либо внятного объяснения. Здесь уместно вспомнить известного английского физика О.Хевисай-

да (1850—1925), который писал: «Опыт научил меня, что если статья отвергнута по неубедительным и общепринятым причинам, то это значит, что статья непривычно оригинальна и хороша. Факт!» [4].

В 1888 г., почти за полвека до фиановских ученых, Хевисайд теоретически открыл «коническое излучение» электрического заряда, движущегося со скоростью, большей скорости света в эфире (пустоте) или в диэлектрике [5]. Далеко не все знают об этой истории и расчете Хевисайда, впоследствии надолго забытого.

Следует заметить, что до создания теории относительности Эйнштейна в 1905 г. ничто не препятствовало рассмотрению движения частиц как в пустоте (эфире), так и в среде со скоростями, равными и большими скорости света. Хевисайд не разделял движение электрона в эфире и в веществе, рассматривая эти две задачи одновременно с учетом диэлектрической постоянной ϵ и магнитной постоянной μ как для эфира, так и для среды. Более того, он отмечал, что будет использовать и для эфира постоянные ϵ_0 и μ_0 , не полагая их равными 1, как предлагал Герц. Хевисайд подчеркивал, что эфир рассматривается в качестве некой среды, обладающей электрическими и магнитными свойствами, и поэтому считал более физичным оставить для нее обозначения характеристик ϵ_0 и μ_0 , как и для любой другой среды. Только после создания теории относительности движение частиц в пустоте и в среде резко разграничились. В первом случае их движение со скоростью больше скорости света в вакууме абсолютно запрещено. Движение частиц со скоростью выше фазовой скорости света в среде вполне допустимо. Свое открытие Хевисайд сформулировал так: «Электрическое смещение (индукция) для точечного заряда представляет собою коническую поверхность сзади заряда, сопровождаемую дополнительным

распределением внутри конуса. Очевидно, возникают тянущие назад силы, и энергия будет равномерно затрачиваться при постоянном нарастании конуса в его вершине, что целиком покрывается действием прилагаемой движущейся силы. Это то, что я подозревал в 1888 г. и позже разработал в математическом исследовании». Хевисайд также делает замечание, касающееся практической важности своего открытия (26 февраля 1898 г.). «Это может стать практически важным в связи с “катодными лучами” и “X-лучами”, поскольку Дж. Дж. Томсон и другие сделали недавно заключение из экспериментов, что скорости заряженных частиц оказываются значительными по сравнению со скоростью света. Если это целиком подтвердится, мы можем надеяться, что увеличение напряжения произведет скорости, превышающие скорость света, если они уже не существуют, и таким образом, приведет к конической теории (the conical theory)». В своих расчетах Хевисайд естественно получил и значение угла при вершине конуса, соответствующее известной формуле $\cos\theta = 1/\beta$ (у него $n=1$). Хевисайд в своих работах опередил время на полвека.

Черенкова несправедливо и неприлично долго не выбирали в Академию (открытие — 1934—1937 гг., Нобелевская премия — 1958 г., член-корреспондент — 1964 г., академик — 1970 г.). В воспоминаниях о своем отце, выдающемся физике-экспериментаторе XX в., Е.К.Завойском, его дочь Н.Е.Завойская писала: «Однажды летом еще в начале 60-х годов, когда мы делали покупки на Центральном рынке, отец издали показал мне плотного немолодого мужчину. Запомни, — сказал он, — это живой укор Академии». Слова относились к Черенкову, автору крупного открытия, который в те годы еще не был удостоен звания академика.

Как относились зарубежные коллеги к Черенкову, я могу

проиллюстрировать на одном эпизоде, связанном с Сэмюэлем Тингом, американским ученым китайского происхождения, и относящимся к его первому знакомству с Черенковым. Дело происходило в 1970 г. в Дубне, в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ), где проходила Международная конференция по аппаратуре в физике высоких энергий. Участие в ней принимали многие выдающиеся физики-экспериментаторы из разных стран, с том числе и из США: П.Пановский, С.Тинг и др. Присутствовал там и П.А.Черенков.

Сэмюэль Тинг — физик, который к тому моменту стал известен рядом интересных экспериментов на крупнейших ускорителях мира, привлечших к себе внимание мирового сообщества. По этой причине или по складу характера держался он на публике очень уверенно. Может быть, он предчувствовал свои будущие успехи: в 1976 г. он стал Нобелевским лауреатом за открытие в 1974 г. J/ψ -частицы. Но эти события еще были впереди.

Черенков, который к тому времени уже давно был Нобелевским лауреатом, напротив, держался очень скромно. Шло заседание в конференц-зале лаборатории теоретической физики ОИЯИ. Черенков выбрал себе место далеко не в первых рядах и посадил меня рядом с собой (это был восьмой ряд, я сидел с краю). В перерыве между заседаниями Тинг подошел ко мне и спросил, не мог бы я познакомиться с Черенковым. Зная демократизм Павла Алексеевича и принятые в ФИАНе нормы общения, я ответил: «No problems. Пойдемте, я вас познакомлю». Но не тут-то было. Всегда уверенный в себе Тинг вдруг как-то слегка стушевался: «Нет, Борис, вы пойдите и спросите у П.А.Черенкова, считает ли он возможным, чтобы вы познакомили меня с ним. Если он согласится оказать мне внимание, подайте мне знак рукой». Я поднялся и передал просьбу. Павел Алек-

сеевич тоже как-то ступешался, заерзал: «Борис Борисович, мне как-то неудобно. Может быть, не нужно все это!» Проявив некие дипломатические усилия, я уговорил Павла Алексеевича и подал знак рукой Тингу. И вдруг произошло что-то необыкновенное. Тинг, который находился у входа в зал заседаний, человек немаленького роста, вдруг изменил позу, принял положение полупоклона, принятого на Востоке как форма выражения уважения, сложил руки ладонями вместе и, «вперив» взгляд в Черенкова, медленным шагами, не меняя позы, стал двигаться к Павлу Алексеевичу. Это было настолько необычно, что все обратили на это внимание. Обсуждения смолкли. Неторопливо Тинг поднялся на восьмой ряд к Черенкову, где и был ему представлен. Затем последовало интересное обсуждение черенковских детекторов, причем Тинг демонстрировал необыкновенное внимание и учтивость по отношению к Павлу Алексеевичу. Так прошла первая встреча этих двух физиков.

Нечто похожее произошло и в Троицке (там расположен филиал ФИАНа), где Черенков познакомился с известным американским профессором Дж.Хабблом. Описывая позднее этот эпизод, Хаббл не находил других эпитетов по отношению к Черенкову, нежели легендарный и т.п.

Очень интересно отношение к своим открытиям самого Черенкова. Во время одного из заседаний упомянутой выше конференции, где в каждом докладе звучало его имя: черенковские счетчики, черенковские спектрометры, излучение Вавилова—Черенкова и т.д., Павел Алексеевич наклонился ко мне и тихо



На конференции «Черенковские детекторы и их применение в науке и технологии», посвященной 50-летию открытия излучения и 80-летию Павла Алексеевича. Июль 1984 г.

сказал на ухо: «Борис Борисович, вы знаете, мне все время кажется, что все это относится не ко мне. Что где-то, когда-то жил другой Черенков, вот о нем все и говорят».

Правильная теория эффекта Черенкова, которая полностью объяснила все свойства излучения, была создана в 1937 г. на основе классической электродинамики выдающимися учеными ФИАНа И.Е.Таммом и И.М.Франком [6]. Они показали, что открытое Вавиловым и Черенковым свечение представляет собой излучение заряженной частицы (электрона), движущейся равномерно и прямолинейно со сверхсветовой скоростью в материальной среде, и получили основную формулу направленности излучения и потерь энергии в единицу времени — знаменитую формулу Тамма—Франка. Все расчеты выполнены ими с учетом дисперсии, т.е. зависимости показателя

преломления среды от частоты испускаемого света.

Дальнейшее развитие теории излучения Вавилова—Черенкова связано с именами И.Е.Тамма (временные вопросы излучения), И.М.Франка (использование в теории представления о «длине формирования фотона», введенного Е.Л.Фейнбергом, и др.), В.Л.Гинзбурга (разработка квантовой теории излучения Вавилова—Черенкова), Б.М.Болотовского, В.Н.Цытовича, В.П.Зрелова, Г.А.Аскарьяна, А.А.Коломенского и др.

Уже перечисление этих имен показывает, какой повышенный интерес излучение Вавилова—Черенкова вызывало у многих наших известнейших физиков. Исторически так сложилось, что необычайно тесное сотрудничество теоретиков и экспериментаторов обеспечило многолетнюю определяющую роль российской науки в изучении излучения Вавилова—Черенкова. ■

Литература

1. Вавилов С.И. Свечение Черенкова // Природа. 1991. №3. С.21—23.
2. Зрелов В.П. Излучение Вавилова—Черенкова и его применение в физике высоких энергий. М., 1968.
3. Брумберг Е.М., Вавилов С.И. // Изв. АН СССР. 1933. Серия VII, 919.
4. Appleyard R. Oliver Heaviside — In Pioneers of electrical communication. 1930.
5. Heaviside O. Electromagnetic theory. L., 1922.
6. Тамм И.Е., Франк И.М. // Докл. АН СССР. 1937. №14.

Черенковское излучение в электродинамических структурах

Член-корреспондент РАН А.Н.Лебедев
Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН
Москва

Эффект Вавилова—Черенкова прочно ассоциируется с электромагнитным излучением точечного заряда, равномерно движущегося в неограниченной сильно преломляющей среде [1, 2]. Отчасти это связано с историей выдающегося открытия П.А.Черенкова, который наблюдал именно электромагнитные волны светового диапазона в очень больших (по сравнению с длиной волны) объемах оптически прозрачного вещества с высоким коэффициентом преломления. Так или иначе, большинство последовавших экспериментальных и теоретических работ было выполнено в рамках таких же условий.

На регистрации черенковского излучения коротковолнового диапазона в различных материалах основаны методы детектирования заряженных частиц, широко используемые в современной экспериментальной физике высоких энергий. Для подобных приложений достаточно очень малой излученной энергии — порой считанных квантов на одну частицу. Поэтому другая сторона эффекта — генерация с его помощью мощного высокочастотного излучения различных диапазонов — кажется, на первый взгляд, довольно неожиданной.

На самом деле эффект Вавилова—Черенкова по существу является основой многочисленных устройств традиционной вакуумной электроники. Кроме того, интерпретация с соответствующих позиций работы таких устройств мощной СВЧ-электроники, как линейные резонансные ускорители, релятивистские мощные лампы бегущей волны или лазеры на свободных электронах, играет иногда принципиальную роль. Конечно, во всех этих случаях речь должна идти о коллективном излучении большого числа электронов, или интенсивных электронных пучков.

Эффект Вавилова—Черенкова как общее волновое явление

Распространение в средах мощных электронных пучков на заметные расстояния невозможно из-за рассеяния, ионизационных потерь, перегрева среды и т.д. Правда, еще в 40-х годах В.Л.Гинзбург указал на возможность черенковского излучения при пролете частицы через вакуумный канал в диэлектрике с достаточным показателем преломления, если диаметр канала сравним с длиной генерируемой волны [3]. Такая схема действительно опробована

и вполне работоспособна, хотя и не совсем удобна с технической точки зрения, так как критична к высокочастотным и механическим свойствам диэлектрика. Кроме того, при генерации для прикладных целей нужно позаботиться, чтобы оно распространялось в заданном направлении (обычно совпадаящем с направлением электронного пучка), а это можно наиболее эффективно осуществить в металлических передающих линиях или волноводах. Короче говоря, с точки зрения рассматриваемого ниже круга явлений каноническая постановка задачи об излучении одиночного электрона в неограниченную среду может встретиться только на страницах учебника по электродинамике.

На первый взгляд, отказ от диэлектрических сред с большим показателем преломления означает и отказ от эффекта Вавилова—Черенкова как такового. Однако даже простейшие попытки взглянуть на этот эффект с более общей точки зрения приводят к установлению его глубоких внутренних связей с широким кругом других физических явлений; недаром теоретическую физику полшутя иногда называют наукой об аналогиях. И дело даже не в известных физических параллелях

между оптическим излучением сверхсветового электрона и акустическим излучением сверхзвукового самолета; перенесение понятий, методов, достаточно общих эффектов из одной области физики в другую часто обнаруживает некоторые новые особенности явления.

К установлению таких аналогий (а по существу внутренних связей) можно прийти на основе общности математической формулировки проблемы. Чрезвычайно широкий круг физических явлений описывается волновыми уравнениями, формулирующими простой принцип — возмущение какой-либо величины в данный момент времени в данной точке пространства вызывает последующие возмущения во всех его точках, если диссипация в системе невелика. Через некоторое время (или достаточно далеко от точки начального возмущения) сигнал «забывает» о своем происхождении и представляет собой совокупность свободных волн (мод) с частотами и конфигурацией, которые определяются только свойствами самой системы.

Иногда свободные волны могут быть и совсем медленными в житейском смысле слова, как, например, поверхностные волны в жидкости. Недаром у Козьмы Пруткова сказано: «Бросая камешки в воду, следи за кругами, ими образуемыми, дабы не было это занятие пустым времяпровождением». Учитывая последнее указание, напомним, что брошенный камешек — это точечное мгновенное возмущение поверхности: он утонул и волна ушла. Но вот от палки, равномерно и достаточно быстро ведомой по поверхности спокойной воды, волны распространяются постоянно, образуя за палкой характерные конусы Маха. Впрочем, иначе и быть не может: если источник равномерно движется со скоростью, большей скорости свободных волн, возмущение никогда не опередит его, оставаясь всегда сзади. Кстати, нетрудно сообра-

зить, что косинус угла конуса Маха равен просто отношению скорости свободной волны к скорости источника.

На данную тему можно рассуждать долго и не безрезультатно (например, вполне достойно обсуждения, почему конус Маха от сверхзвукового самолета при прохождении через наши уши воспринимается как удар, а волны от корабля имеют хорошо выраженную плавную гармоническую конфигурацию). Однако излучение Черенкова как таковое является, конечно, электромагнитным и будет обсуждаться далее именно в этих рамках.

Синхронизм волны с движением частиц

Очевидно, что для эффективной генерации мощного электромагнитного излучения необходимо получить от каждого электрона как можно большее число квантов, на что требуется достаточно долгое время. Согласно тривиальному закону сохранения, средняя мощность излучения должна быть равна работе, совершаемой в единицу времени электрическим полем волны над равномерно летящей частицей. Чтобы потерять на излучение существенную долю своей энергии, электрон на всем пути должен находиться примерно в одной фазе волн,

систематически подвергаясь тормозящему действию ее продольного поля. Другими словами, скорость электрона v должна быть примерно равна скорости волны v_w .

Речь, конечно, идет о фазовой скорости волны, т.е. о скорости перемещения ее гребня, причем в том же направлении, в каком движется электрон. Применительно к плоским волнам (собственным волнам неограниченного однородного пространства) понятие фазовой скорости обычно ассоциируется со скоростью перемещения фронта. Для диэлектрика с показателем преломления n она равна c/n . Однако скорость перемещения гребня в направлении движения электрона, как ясно из рис.1, больше и составляет $c/(n \cdot \cos\theta)$. Поэтому из условия равенства скоростей сразу же получается классическое выражение для угла черенковского конуса:

$$\cos\theta = c/vn.$$

Отсюда видно, что в системе разрешено излучение любых волн, у которых фазовая скорость, нормальная к фронту, меньше скорости частицы и $\cos\theta < 1$.

Во избежание недоразумений надо отметить, что фазовая скорость электромагнитных волн в поперечно ограниченных волноводных структурах определена только в продоль-

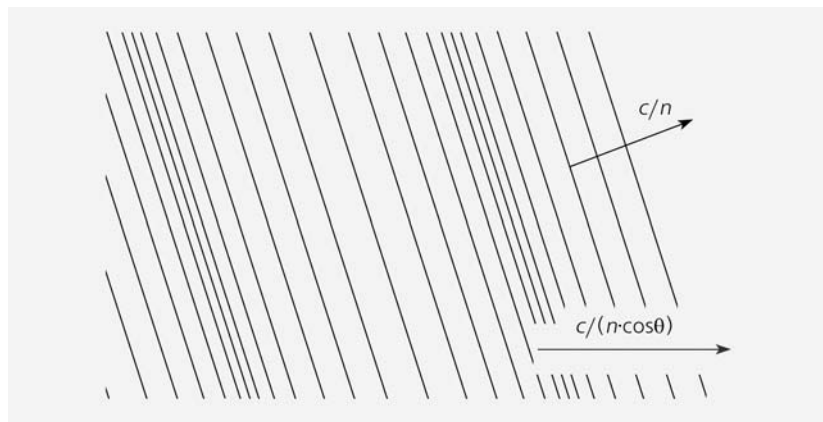


Рис. 1. Фазовая скорость волны перпендикулярно к фронту и вдоль траектории электрона (внизу).

ном направлении. Она бывает и больше, и меньше скорости света в пустоте c , хотя на практике имеет тот же порядок.

Если взглянуть на условие равенства скоростей как на условие систематической передачи энергии от частицы волне, т.е. долговременного излучения, то следует сделать логический вывод: частица, синхронная с некоторыми свободными волнами электродинамической системы, может их излучать (равно как и поглощать в зависимости от начальных условий).

Условие синхронизма относится не только к равномерно летящей частице, но и к движущемуся осциллятору, имеющему в лабораторной системе отсчета некоторую частоту Ω . Такой гармонический осциллятор в неограниченной среде будет, конечно, излучать в любом случае, но движение со скоростью v , превышающей скорость свободных волн, имеет неожиданные особенности, непосредственно относящиеся к эффекту Вавилова—Черенкова.

Условие синхронного взаимодействия осциллятора с волной надо записать как $v_{\text{в}} - v = \pm \lambda \Omega / 2\pi$. Физический смысл этого равенства очевиден: систематическая передача энергии возможна, если за время одного периода осциллятора $2\pi/\Omega$ волна обгоняет (знак +) или отстает от частицы (знак -) точно на одну длину волны λ . В частности, из данного соотношения немедленно следует эффект Доплера, который заключается в том, что в направлении своего движения осциллятор излучает частоту ω , превышающую собственную:

$$\omega = 2\pi v_{\text{в}} / \lambda = v_{\text{в}} \Omega / (v - v_{\text{в}}).$$

Отметим, кстати, что при $v \rightarrow v_{\text{в}}$ доплеровское смещение частоты может достигать колоссальных значений.

Однако в данном контексте заслуживает внимания другой вопрос: что происходит с амплитудой колебаний, когда осциллятор излучает? Напрашивающийся ответ — колебания все-

гда затухают — неверен. Простой расчет, основанный на законах сохранения энергии и импульса, показывает, что изменение энергии колебаний W (т.е. энергии в системе центра тяжести осциллятора) связано с изменением полной энергии E неожиданным соотношением:

$$\Delta W = \Delta E \cdot (1 - v/v_{\text{в}}).$$

Таким образом, если свободная волна имеет скорость, меньшую скорости частицы, то при очевидном уменьшении полной энергии излучателя амплитуда его колебаний возрастает. Поскольку при этом растет и излучаемая мощность, процесс должен развиваться лавинообразно.

Любопытно, что излучение возможно даже при нулевой начальной амплитуде, т.е. при $W = 0$. Такие необычные свойства дали основание назвать это явление аномальным Доплер-эффектом. Его особенности, конечно же, не покушаются на закон сохранения энергии. Источником последней служит энергия продольного движения, которой затрачивается больше, чем необходимо просто на излучение.

Заметим, что аналогичные рассуждения, основанные на законах сохранения, применимы и к равномерному движению свободной частицы, т.е. к черенковскому излучению как таковому. Поскольку внутренняя энергия (т.е. энергия покоя) не может ни уменьшиться, ни увеличиться ($\Delta W = 0$), излучение возможно только при $v = v_{\text{в}}$. Как уже упоминалось, в неограниченной среде это соответствует черенковскому углу $\theta = \arccos(c/vn)$.

Излучение в волноводных структурах

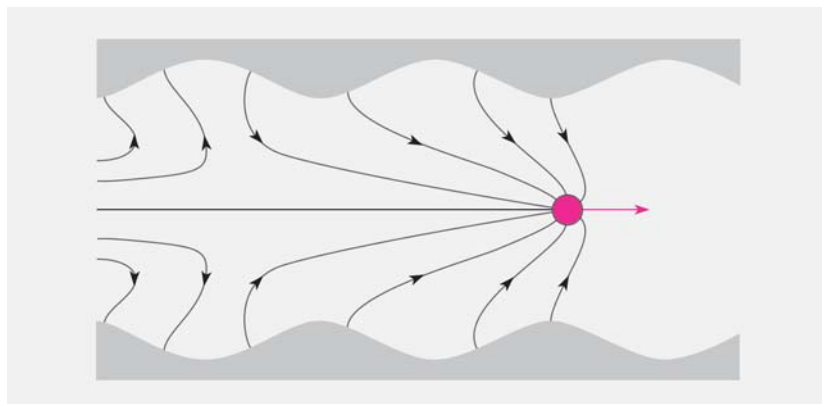
Коль скоро необходимым условием черенковского излучения оказывается синхронизм частицы с волной, оно возможно в волноводных или подобных

им структурах даже без диэлектрика, играющего в неограниченной среде просто роль замедлителя. Как уже упоминалось, вакуумные волноводные системы так или иначе необходимы для проводки электронного пучка на большое расстояние.

В таких системах поле не обязано спадать с удалением от источника, как было бы в случае неограниченной среды в силу принципа причинности. Последний проявляется теперь в том, что перед частицей поле черенковского излучения равно нулю, а распространяется по системе оно в виде шлейфа (рис.2). Понятие черенковского конуса в поперечно ограниченной системе теряет смысл. Заметим, что электромагнитная энергия, заключающаяся в шлейфе свободных волн, распространяется с групповой скоростью, которая, как правило, меньше фазовой. Если они направлены в одну сторону, то поле в непосредственной близости к частице «накапливается», монотонно возрастая с пройденным расстоянием.

Эта картина омрачается только одним, но немаловажным обстоятельством [4]: в металлическом однородном волноводе (или передающей линии) фазовая скорость всех свободных волн больше (или равна) скорости света c . В противном случае в системе отсчета, движущейся вместе с волной, мы увидели бы бессмысленную картину: стационарное электрическое поле в отсутствие своих источников, т.е. зарядов. Чтобы снизить скорость, используют волноводы с диэлектрическим покрытием стенок или системы типа спиралей и волноводов, периодически нагруженных диафрагмами, или, наконец, ребристые поверхности типа дифракционных решеток. В подобных системах возможно распространение медленных волн и, следовательно, черенковское излучение. Надо сразу же подчеркнуть, что во всех случаях эффективно излучать будет только частица, которая

Рис.2. Структура силовых линий электрического поля электрона в гофрированном волноводе медленных волн.



пролетает в непосредственной близости от поверхностей, ведущих волну. За критерий близости можно принять величину порядка длины волны (с некоторыми оговорками для частиц очень высокой энергии). Если совместить это требование с естественными геометрическими ограничениями при транспортировке мощных пучков электронов, становится ясно — использование черенковского излучения для обсуждаемых целей возможно в относительно длинноволновом диапазоне.

Строго говоря, свободные волны в периодических структурах не периодичны в пространстве, так что понятие фазовой скорости применимо к ним только с серьезными оговорками, на которых мы здесь останавливаться не будем. Впрочем, иногда на этой особенности периодических структур основывается альтернативная интерпретация явления. В качестве примера можно привести так

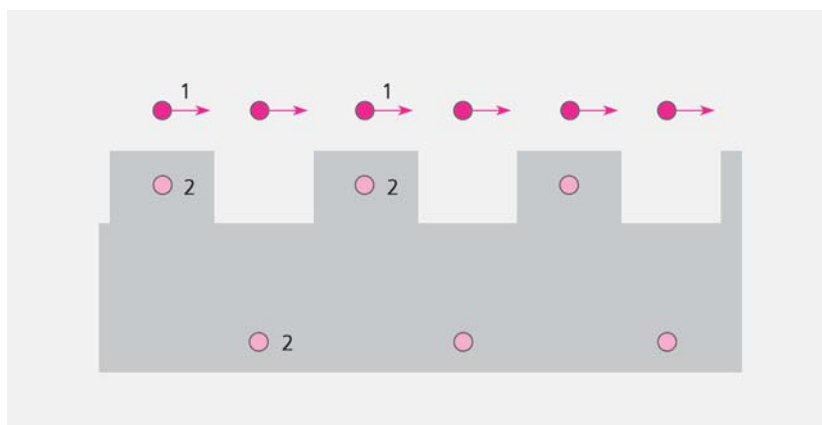
называемый эффект Смита—Перселла, состоящий в том, что частица излучает, пролетая вблизи гофрированной проводящей поверхности. Авторы дали ему не лишнюю изящества интерпретацию: сама частица движется равномерно и прямолинейно, а ее электростатическое изображение в идеально проводящей поверхности испытывает скачки (см. рис.3), так что дипольный момент системы периодически зависит от времени и дает излучение. Правда, такая интерпретация (вместе с понятием электростатического изображения) имеет смысл только для нерелятивистских частиц и при достаточно больших периодах гофра. Специалисты по СВЧ-электронике, конечно, сразу же идентифицируют это явление как хорошо им известное излучение «на гребенке» [5]. К последнему остается только добавить, что в основе процесса лежит черенковское излучение медленной поверх-

ностной волны, распространяющейся вдоль решетки с той же скоростью, что и частица.

Другой пример альтернативной интерпретации представлен на рис.4, где частица пролетает через последовательность одинаковых электродинамически не связанных резонаторов. С одной стороны, такую систему можно рассматривать как очень сильно диафрагмированный волновод, к которому применима концепция медленных собственных волн. С другой стороны, электромагнитные колебания в резонаторах происходят на одной и той же собственной частоте (мы учитываем только основную моду), хотя и могут быть сдвинуты по фазе, образуя в масштабе всей системы бегущую замедленную волну. В каждом резонаторе частица излучает при выходе из торцевой стенки и при входе в последующую, так что применительно к одной ячейке эффект естественно интерпретировать как переходное

Рис.3. Интерпретация эффекта Смита—Перселла как излучения переменного диполя.

1 — равномерно движущиеся заряды.
2 — их электростатическое изображение в проводящей стенке.



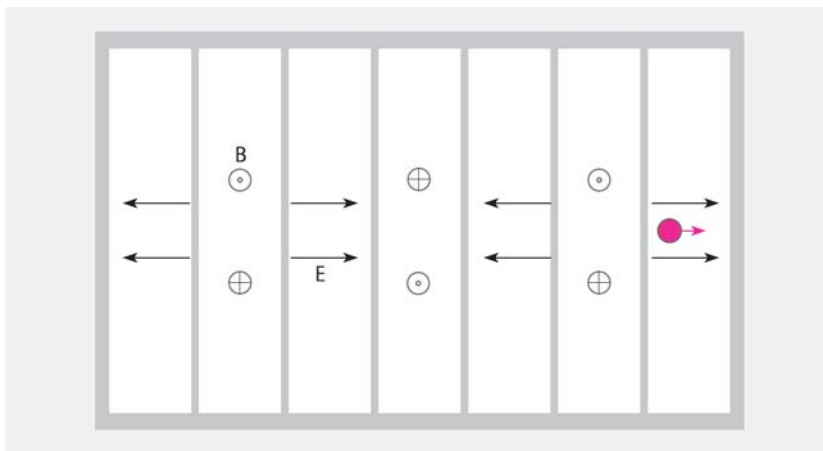


Рис.4. Волна, возбуждаемая электроном в цепочке не связанных резонаторов. **B** — вектор магнитной индукции, **E** — вектор напряженности электрического поля.

излучение. Сдвиг фазы между соседними ячейками автоматически определяется скоростью частицы, поэтому возникло название «резонансное переходное излучение», иногда распространяемое и на другие периодические системы. На наш взгляд, физически это не слишком оправдано, так как этимологически само понятие «переходное» относится к однократному акту излучения, тогда как «резонанс» подразумевает долговременный процесс. Что касается амплитуды поля в уже пройденных ячейках, то она остается без дальнейших изменений, поскольку групповая скорость в системе не связанных резонаторов равна, конечно, нулю.

чайными фазами и, следовательно, с разными знаками. Можно даже сказать, что почти половина частиц излучает энергию, а почти половина поглощает ее. Результирующая же мощность обусловлена этим самым «почти», т.е. случайными отклонениями плотности частиц от равномерной. Такое излучение ансамбля частиц принято называть спонтанным, или полностью некогерентным.

Положение резко меняется, если расположение частиц упорядочено в масштабе длины излучаемой волны. В качестве простейшего примера обычно приводят «точечный» (т.е. с размерами, меньшими длины волны) сгусток, состоящий из N идентичных частиц. Для него

поля излучения точно складываются, а мощность, пропорциональная квадрату поля, увеличивается по сравнению с одной частицей в N^2 (а не в N) раз. Такое излучение называется полностью когерентным, и при большом N оно может достигать значительных мощностей, полностью повторяя по остальным характеристикам — направленности, спектру и т.д. — излучение отдельной частицы.

Как всегда, дьявол кроется в деталях: реальный сгусток одноименно заряженных частиц представляет собой весьма короткоживущее образование, особенно при малых размерах. Поэтому для излучения на коротких волнах и достаточно длительного числа N не может

Когерентное черенковское излучение

Мощность черенковского излучения одиночной частицы в лучшем случае составляет по порядку величины лишь доли микроватта, что достаточно для регистрации отдельных частиц, но, конечно, не представляет никакого интереса для генерации электромагнитных колебаний. Даже большое количество одновременно излучающих частиц не исправляет положения. Причина в том, что суммарное поле излучения складывается из индивидуальных полей со слу-

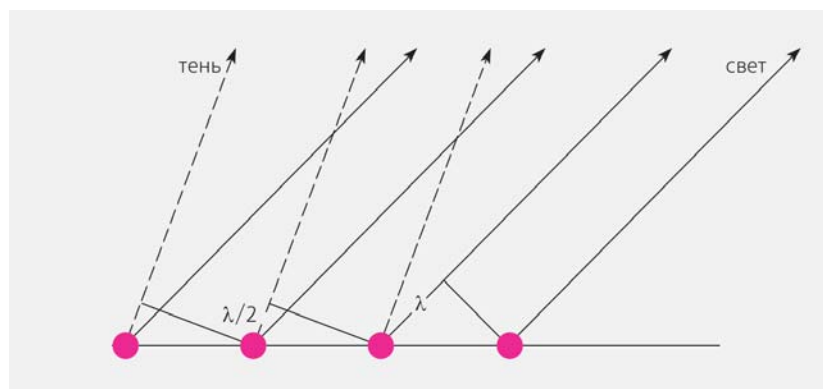


Рис.5. Угловое распределение когерентного черенковского излучения цепочки зарядов. Излучение с длиной волны λ от двух соседних сгустков гасится в направлении, показанном штриховыми линиями, так как волны находятся в противофазе, и усиливается в направлении, показанном сплошными линиями (волны синфазны).

быть велико. Эту трудность можно было бы обойти, жестко размещая излучающие частицы друг относительно друга на расстоянии, равном одной длине волны. Тогда поля излучения в направлении движения складываются по-прежнему в фазе, а размер цуга частиц в продольном направлении и, соответственно, их полное число теоретически ничем не ограничены, кроме длины системы. Практически надо говорить о регулярно расположенных сгустках частиц небольшой плотности.

Такая модель когерентно излучающих частиц имеет существенную особенность, четко выраженную для цепочки, которая излучает в неограниченную среду. Как ясно из рис.5, когерентное сложение при заданной длине волны возможно, если расстояние между сгустками чуть превышает ее. В этом случае когерентное излучение должно быть монохроматическим и резко направленным вперед, что важно для его эффективного использования. В поперечно ограниченных электродинамических структурах, где понятие угла распространения излучения теряет смысл, произвольное периодическое распределение либо вообще не излучает когерентно, либо излучает лишь одну моду с частотой и длиной волны, заданными периодом и синхронной фазовой скоростью.

Индукцированное черенковское излучение

Реализация возможностей когерентного излучения упирается, конечно, в проблему «приготовления» пучка электронов, состоящего из регулярной заданной последовательности сгустков или, по крайней мере, модулированного по плотности с периодом, соответствующим длине волны. В некоторых случаях это может быть осуществлено небольшой начальной мо-

дуляцией скорости частиц с последующей их группировкой в дрейфовом пространстве (клизотрон), либо механическим «нарезанием» пучка входным модулятором плотности (чоппертрон). Кстати, последний метод, возможно, получит новое рождение в связи с появлением современных фотокатодов, активируемых последовательностью коротких импульсов лазерного света.

Все эти методы имеют свои недостатки физического или технического характера, особенно при переходе ко все большим мощностям и частотам генерируемого поля. К счастью, сама природа предлагает некоторый альтернативный выход на основе так называемого эффекта индуцированного излучения.

В своей общей постановке эффект индуцированного излучения заключается в том, что полная мощность излучения при наличии уже существующего поля пропорциональна мощности последнего. Более того, излучаемые кванты оказываются точной репликой существующих по частоте, направлению и поляризации. Важно только, чтобы процесс излучения мог превалировать над обратным процессом поглощения. В квантовых генераторах когерентного излучения (мазерах и лазерах) это достигается за счет специфического распределения излучателей по энергетическим уровням (инверсной заселенности). Эффект настолько прост с квантовомеханической точки зрения и стал таким привычным, что его физический механизм даже не обсуждается. Однако в классической системе, какой является поток электронов, механизм индуцированного излучения требует объяснения.

Амплитуда поля черенковского излучения, разумеется, не зависит от наличия уже имеющейся волны. Все дело в когерентном сложении полей. Если поле черенковского излучения

находится в фазе с внешним, то выходная мощность увеличивается; если в противофазе, то уменьшается (именно за счет черенковского излучения!). Вопрос в том, каким будет результат при изначально случайном распределении индивидуальных излучателей по фазам.

Для волны, точно синхронной с частицами, и при случайном распределении по фазе ответ прост и довольно пессимистичен: мощность складывается с мощностью имеющейся волны. Интереснее дело обстоит для волн, чуть-чуть более медленных, чем электроны. Излучатели, находившиеся в тормозящей фазе, отстают волне энергию и замедляются, приближаясь к точному синхронизму — их фаза меняется все медленнее и медленнее. Те, что находятся в противофазе, наоборот, ускоряются, быстро меняют фазу и нагоняют первые. Но эти процессы теперь несимметричны. В результате встреча происходит в среднем в тормозящих фазах, где образуются соответствующие локальные увеличения плотности (см. рис.6). Другими словами, реакция излучения такова, что пучок самопроизвольно разбивается на сгустки, находящиеся в тормозящих фазах. Остальное доделывает когерентность, резко увеличивая мощность излучения данной волны. Нетрудно сообразить, что для волн, чуть более быстрых, чем частицы, ситуация обратная — они поглощаются.

В применении к черенковскому излучению все эти рассуждения требуют специальной оговорки, поскольку выше декларировалось, что излучаться может лишь точно синхронная волна. Однако это верно только для бесконечно длинной системы, а на конечной длине излучается спектральная линия конечной ширины. Ясен и критерий синхронности — в реальной системе излучаются все медленные волны, которые не успели почувствовать свою несинхронность. Это означает, что инду-

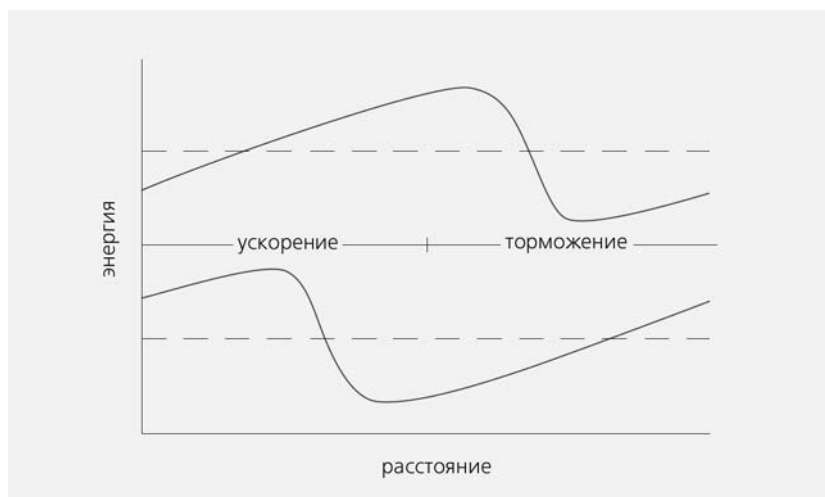


Рис. 6. Перераспределение изначально однородного пучка (штриховая линия) в результате индуцированного излучения (верхняя кривая) и поглощения (нижняя кривая).

цируется излучение всех возможных волн, отстающих от частицы по фазе не больше чем на π , а все остальные поглощаются пучком либо вообще не взаимодействуют с ним. Поскольку усилению не подвергаются ни точно синхронные волны, ни слишком медленные, имеется некоторая оптимальная мода, которая в конце концов и выживает в борьбе за существование, экспоненциально усиливаясь.

Естественно, чем сильнее описанная автофазировка, пропорциональная мощности волны, тем больше мощность когерентного излучения, которое и надо интерпретировать как индуцированное. Конечно, полной когерентности добиться нельзя, и реально модуляция плотности пучка составляет на практике всего несколько процентов. Однако из-за большого числа частиц результат может быть весьма впечатляющим. Так, мощный пучок сильноточного ускорителя с импульсным током 10 кА излучает импульсную мощность порядка гига-ватт, тогда как в режиме спонтанного излучения он должен был бы давать несколько ватт (правда, в данном случае используется несколько другой механизм излучения, но соот-

ношение остается того же порядка и для черенковского генератора).

Сформулируем теперь вывод из этих качественных рассуждений. Если имеется вакуумная электромагнитная структура, допускающая распространение медленных волн, то прямолинейный поток релятивистских электронов спонтанно разбивается на последовательность сгустков и в силу эффекта Вавилова—Черенкова когерентно излучает волны, которые несколько медленнее частиц. В оптимальных условиях при этом оказываются волны, отстающие от частицы на всей длине системы примерно на половину длины волны. Такие волны эволюционируют вдоль системы, существенно повышая свою мощность и монохроматизируясь.

Надо признать, правда, что устройство, основанное на рассмотренных явлениях, известно в радиоп физике довольно давно как лампа бегущей волны. Исторически его работа объяснялась из других представлений, но концепция индуцированного черенковского излучения позволяет продвинуться дальше, предсказывая и новые особенности взаимодействия пучка с волной.

Когерентное излучение взаимодействующих частиц

Упомянутый в заголовке процесс происходит в плотных пучках, где существенно сказываются эффекты взаимного кулоновского расталкивания частиц. Кажущееся интуитивно ясным противодействие кулоновских сил группирующему действию поля излучения при ближайшем рассмотрении не так очевидно. Действительно, в системе отсчета, связанной с пучком, расталкивающее действие кулоновских сил отнюдь не разрушает возникшую по каким-то причинам модуляцию плотности, а лишь инициирует незатухающие и распространяющиеся вдоль пучка симметрично в обе стороны волны (так называемые плазменные волны). В лабораторной системе отсчета эти волны переносятся вдоль пучка в одну сторону, но одна оказывается чуть быстрее частиц пучка (хотя и всегда медленнее света), а другая чуть медленнее. Таким образом, достаточно плотный пучок выглядит как континуум, по которому распространяются волны пространственного заряда. В качестве источника черенковского излучения теперь выступают не отдельные частицы, а максимумы плотности, причем когерентность обеспечивается, когда частота и фазовая скорость волны пространственного заряда совпадают с частотой и фазовой скоростью электромагнитной волны в отсутствие пучка. В итоге создаются новые интересные физические ситуации.

Прежде всего, появляется возможность когерентного черенковского излучения для волн, более быстрых, чем частицы. При этом входящий пучок должен быть изначально промодулирован достаточно быстрой волной пространственного заряда. По существу, такой метод был бы модификацией упомянутого выше чоппертрона, но поз-

волил бы использовать частицы меньшей энергии. К сожалению, индуцированное излучение в данном варианте невозможно, и амплитуда волны пространственного заряда уменьшается при возникновении и развитии волны излучения.

При совпадении частот и фазовых скоростей электромагнитной волны и медленной волны пространственного заряда возможно и индуцированное излучение. Интересно, что амплитуды обеих волн при взаимодействии возрастают: первая в силу излучения, а вторая из-за сопутствующей группировки частиц. По этой причине медленную волну пространственного заряда относят к классу так называемых волн с отрицательной энергией, имея в виду, что суммарная кинетическая энергия частиц в возбужденном состоянии меньше, чем в равновесном. Так получается потому, что в местах с большей плотностью частицы имеют меньшую скорость, чем в разрежениях. Суммарный же энергетический баланс остается положитель-

ным за счет уменьшения средней скорости частиц. Стоит обратить внимание на внутреннюю связь этого явления и аномального эффекта Доплера, где амплитуда осциллятора возрастает при испускании фотона.

Таким образом, при большой плотности пучка, характерной для электроники больших мощностей, реализуется своеобразный режим, когда вместе с излучением фотона происходит и излучение плазмона — кванта волны пространственного заряда. Коэффициент усиления внешней «затраваочной» волны зависит от тока пучка несколько слабее, чем в режиме малой плотности, но практически может достигать очень больших величин.

* * *

Чтобы все сказанное выше не казалось абстрактным теоретизированием, стоит привести некоторые цифры. Наиболее впечатляют, пожалуй, работы по достижению большой импульсной мощности, заложившие основу нового направления — импульс-

ной сильноточной электроники. Уже в первых экспериментах с сильноточными пучками, выполненных на почти интуитивном уровне в начале 70-х годов в Корнелльском университете в США и в Физическом институте им. П.Н. Лебедева (ФИАН), была получена мощность порядка сотен мегаватт в десятисантиметровом диапазоне длин волн. Первые целенаправленные разработки релятивистской лампы обратной волны были проведены совместно ФИАНом и Институтом прикладной физики (Н.Новгород), а также в Мерилендском университете (США). Рекорд же (в районе десятка гигаватт) принадлежит, по-видимому, Институту сильноточной электроники (Томск). Правда, от практически используемого генератора требуется не только, и даже не столько импульсная мощность, сколько и некоторые другие характеристики — высокий КПД, низкий уровень шумов, стабильность и т.д., но это тема уже другого разговора, не связанного непосредственно с эффектом Вавилова—Черенкова. ■

Литература

1. *Болотовский Б.М.* // Труды ФИАН. 1982. Т.140. С.95—140.
2. *Джелли Дж.* Черенковское излучение и его применение. М., 1960.
3. *Гинзбург В.Л., Франк И.М.* // Докл. АН СССР. 1947. Т.75. С.699—704.
4. *Вайнштейн Л.А.* Электромагнитные волны. М., 1988.
5. *Милованов О.С., Собенин Н.П.* Техника сверхвысоких частот. М., 1980.

Детекторы черенковского излучения

Член-корреспондент РАН С.П.Денисов
 Институт физики высоких энергий
 Протвино

В последние десятилетия было создано так много самых разных черенковских счетчиков, а область их применения настолько расширилась, что не стоит и пытаться охватить все в одной статье. Попробуем на конкретных примерах дать представление о том, сколь велико практическое значение эффекта излучения сверхсветовых частиц, открытого П.А.Черенковым 70 лет назад.

Свойства черенковского излучения

Свечение Черенкова возникает при движении заряженной частицы в среде со скоростью v , превышающей скорость c/n распространения света в этой среде (c — скорость света в вакууме, n — показатель преломления среды), т.е. при

$$\beta = \frac{v}{c} > \frac{1}{n}. \quad (1)$$

Излучение имеет узкую угловую направленность, обнаруженную Черенковым еще в первых опытах. В изотропных средах оно распространяется вдоль поверхности конуса под

углом θ к траектории частицы таким, что

$$\cos\theta = \frac{1}{\beta n}. \quad (2)$$

Интенсивность свечения была рассчитана И.Е.Таммом и И.М.Франком. Если на пути длиной l изменение β мало и в диапазоне длин волн $\lambda_1 \div \lambda_2$ ($\lambda_2 > \lambda_1$) можно пренебречь дисперсией среды (т.е. зависимостью n от λ), то число фотонов, излученных в этом спектральном интервале, равно

$$N = 2\pi\alpha Z^2 l \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) = 2\pi\alpha Z^2 l \sin^2\theta \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right), \quad (3)$$

где $\alpha = 1/137$ — так называемая постоянная тонкой структуры и Z — заряд частицы в единицах заряда электрона.

Чтобы представить масштаб эффекта, рассмотрим два примера. Пусть сначала ультрарелятивистская частица ($\beta \cong 1$) с $Z=1$ движется в воздухе, показатель преломления которого при давлении 1 атм и температуре 20°C равен 1.000273. Тогда угол θ составит 23 мрад или чуть больше 1°, и на пути 1 м частица излучит всего около 50 фотонов в интервале длин волн $0.3 < \lambda$ (мкм) < 0.7 , который соответствует области чувствительности обычных фо-

тоэлектронных умножителей (ФЭУ). В слегка расширенном диапазоне $0.2 < \lambda$ (мкм) < 0.7 (ФЭУ с кварцевыми окнами) число фотонов составит уже 90.

Теперь представим, что та же частица пересекает слой стекла с $n = 1.5$ и толщиной 1 см. В этом случае $\theta = 48^\circ$, и в стекле образуется около 500 фотонов в области λ от 0.3 до 0.7 мкм.

Получается, что свечение весьма слабое: не случайно Черенкову приходилось подолгу адаптироваться в темной комнате, чтобы его увидеть (глаз в то время был самым чувствительным «фотоэлементом»). Из-за малой интенсивности перспектива практического применения черенковского излучения открылась не сразу. Лишь с созданием ФЭУ, способных регистрировать очень слабые потоки света вплоть до отдельных фотонов, положение резко изменилось, и, начиная с 50-х годов прошлого столетия, началось бурное развитие детекторов частиц, основанных на эффекте Черенкова.

Остановимся на тех из них, которые предназначены для идентификации (определения масс) релятивистских частиц в экспериментах на ускорителях и для регистрации космического излучения. Далее, как это принято в физике высоких энергий, скорости частиц будут измерять-

ся в единицах скорости c распространения электромагнитных волн в вакууме, заряды — в единицах заряда e электрона, энергии E — в МэВ (10^6 эВ) и ГэВ (10^9 эВ), импульсы p — в МэВ/с и ГэВ/с, массы — в МэВ/с². Например, массы электрона, мюона, π^+ - и K^+ -мезона и протона равны соответственно 0.511, 106, 140, 494 и 938 МэВ/с².

Газовые черенковские счетчики

Основная задача черенковских счетчиков в экспериментах на современных ускорителях с энергиями в десятки и сотни ГэВ состоит в идентификации частиц, для чего измеряются их скорости β и затем по известным импульсам p определяются массы покоя $m = p \sqrt{1-\beta^2} / \beta c$. Скорость релятивистской частицы, энергия которой во много раз превышает mc^2 , можно с хорошей точностью вычислить по формуле:

$$\beta = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{mc}{p} \right)^2. \quad (4)$$

Из (4) следует, что, например, разница скоростей π - и K -ме-

зонов с одинаковым импульсом $p = 40$ ГэВ/с, доступным на протонном ускорителе Института физики высоких энергий (ИФВЭ) в г.Протвино, составляет всего $7 \cdot 10^{-5}$, и для их разделения необходимо измерять скорости с точностью $\Delta\beta \leq 10^{-5}$. Столь высокая точность может быть достигнута при помощи газовых черенковских счетчиков — пороговых, дифференциальных или типа RICH.

В пороговых черенковских счетчиках для идентификации частиц используется условие (1): излучают черенковский свет и, следовательно, могут быть зарегистрированы только те частицы, скорость которых превышает пороговую величину $\beta_c = 1/n$. Рис.1,а представляет оптическую схему одного из пороговых счетчиков, используемых в ИФВЭ, а рис.1,б показывает, как с его помощью можно, например, отделить π^+ -мезоны от K^+ -мезонов и протонов в пучке частиц с импульсом 35 ГэВ/с. Счетчик наполняется аргоном. При не очень больших давлениях P зависимость показателя преломления аргона от P можно выразить приближенной формулой: $n(P) = 1 + 3 \cdot 10^{-4} P$. Используя приведенные выше соотноше-

ния, нетрудно оценить пороговое значение давления $P_c \approx 1.7 \cdot 10^3 \cdot (mc/p)^2$, при превышении которого частица с массой m и импульсом p начнет излучать черенковский свет. При давлении аргона ниже порога для π^+ -мезонов срабатывание счетчика в основном связано с небольшой (~1%) примесью позитронов и μ^+ -мезонов в пучке, сцинтилляциями аргона под действием проходящих через счетчик частиц и шумами ФЭУ. Скорость счета при этом находится на уровне нескольких отсчетов/с. Как только давление перешагнет порог, соответствующий началу излучения пионов, скорость счета начинает быстро расти и постепенно выходит на плато, когда число черенковских фотонов становится достаточным для регистрации каждого пиона. Аналогичные скачки скорости счета наблюдаются при переходе давления через пороги излучения каонов и протонов. Из рис.1,б следует, что при давлении аргона 0.2+0.3 атм. счетчик регистрирует почти все пионы и слабо чувствителен к каонам и протонам.

Очевидно, что при помощи одного порогового счетчика указанным способом можно

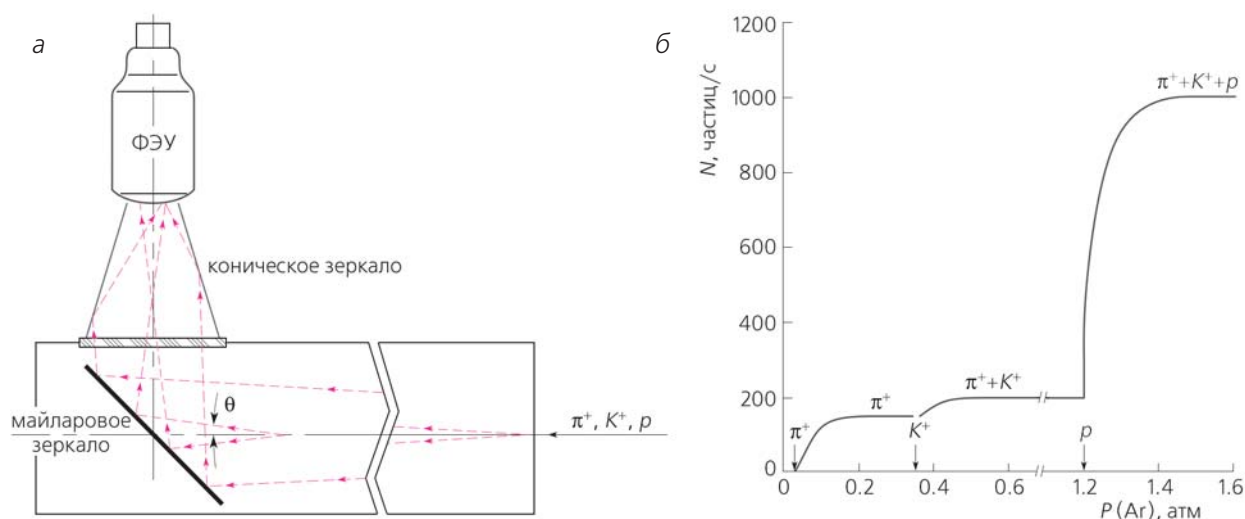


Рис.1. Схема порогового черенковского счетчика (а) и зависимость скорости счета частиц в пучке с импульсом 35 ГэВ/с от давления аргона в пороговом черенковском счетчике (б). Стрелками показаны пороговые значения давления.

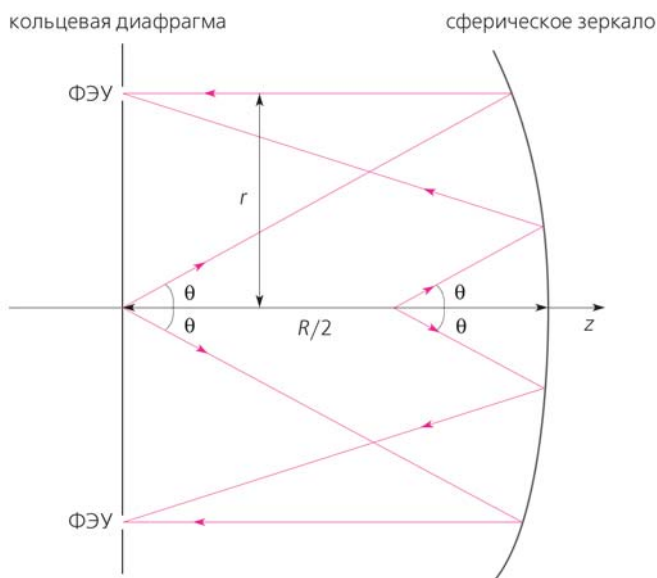


Рис.2. Схема дифференциального счетчика.

идентифицировать только самые легкие частицы. Представим читателю самому сообразить, как можно выделить в пучке, например, каоны, используя два пороговых счетчика. Но обычно для этой цели применяют дифференциальный счетчик.

Разделение частиц с разными массами по скоростям в дифференциальных черенковских счетчиках основано на связи (2) между скоростью β и углом θ . Черенковский свет, излученный под углом θ , собирается в фокальной плоскости сферического зеркала (рис.2) в кольцо радиуса

$$r = \frac{R}{2} \operatorname{tg} \theta, \quad (5)$$

где R — радиус зеркала. Если в фокальной плоскости расположить кольцевую диафрагму и установить за ней ФЭУ, можно выделить частицы со скоростью β , определяемой формулами (2), (5) (значения r , R и n предполагаются известными).

Точность $\Delta\beta$ определения скорости ограничивается несколькими факторами, главный из которых — дисперсия газа

в счетчике, т.е. зависимость показателя преломления n и, следовательно, угла θ от длины волны света λ (рис.3). Этот эффект приводит к тому, что кольцо черенковского излучения в фокальной плоскости сферического зеркала (рис.2) окрашено во все цвета радуги, причем его внешний радиус имеет фиолетовый оттенок, а внутренний — красный (рис.4). Оказывается, что $\Delta\beta = \Delta n/n$, где Δn — изменение показателя преломления в интервале $\lambda_1 \div \lambda_2$ чувствительности счетчика (рис.3). Отношение $\Delta n/n$ зависит от сорта газа, примерно пропорционально его давлению и для современных приборов находится в пределах $(2 \div 4) \cdot 10^{-5}$ в спектральном диапазоне от 0.2 до 0.7 мкм. Можно ли построить дифференциальный счетчик с лучшим разрешением? Да, можно.

Простой путь — сужение спектрального диапазона (рис.3) и/или уменьшение давления газа и, следовательно, угла излучения. Однако это невыгодно, так как оба варианта приводят к потере и без того малой интенсивности черенковского света (3). Ослабление свечения при

уменьшении угла излучения или «обрезании» спектрального диапазона можно, вообще говоря, компенсировать увеличением длины счетчика. Но тогда быстро растут не только продольные, но и поперечные размеры детектора, усложняется его конструкция и возрастает стоимость. Кроме того, размеры счетчика часто бывают ограничены условиями эксперимента. Более сложное, но и более эффективное решение проблемы — прибегнуть к специальной оптике, компенсирующей зависимость $\theta(\lambda)$. Впервые такое устройство (дублет конических призм из кристалла NaCl и плавленного кварца, установленный перед кольцевой диафрагмой) было применено в счетчике [1], который использовался для идентификации частиц в пучках ускорителей ЦЕРН и ИФВЭ. Компенсация дисперсии газа позволяет достигнуть разрешения $\Delta\beta/\beta \sim 10^{-6}$ при регистрации частиц в пучках с энергией сотни ГэВ.

Отметим, что все черенковские фотоны, независимо от места излучения, соберутся в фокальной плоскости одновременно. Благодаря этому черенковские счетчики обладают очень хорошим временным разрешением, которое определяется только свойствами ФЭУ и регистрирующей электроники.

На рис.5 показана зависимость скорости счета π^- , K^- -мезонов и антипротонов с импульсом 45 ГэВ/с от величины показателя преломления рабочего газа (CO_2) в дифференциальном счетчике с компенсацией дисперсии [2], разработанном в ИФВЭ. Видно, что при помощи счетчика можно надежно идентифицировать все три сорта частиц, хотя доля каонов в пучке составляет всего ~ 0.01 , а антипротонов еще в 10 раз меньше. Счетчик использовался во многих экспериментах на ускорителе ИФВЭ, в том числе для исследований закономерностей рождения частиц в сильных взаимодействиях, которые привели

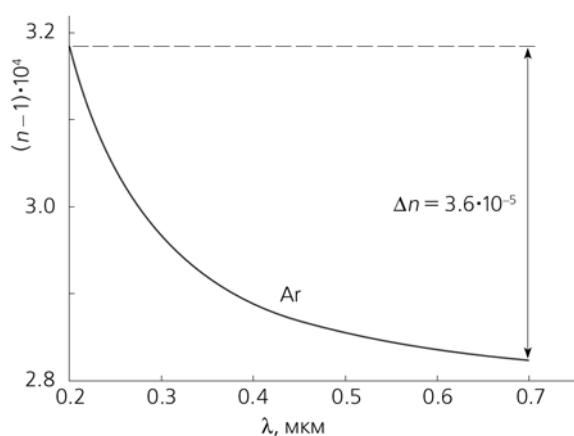


Рис.3. Зависимость показателя преломления аргона от длины волны.

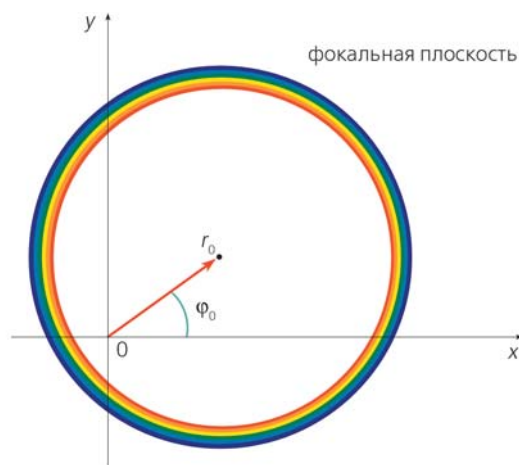


Рис.4. Положение кольца черенковского света в фокальной плоскости сферического зеркала (см.рис.2). Радужная окраска кольца связана с дисперсией газа.

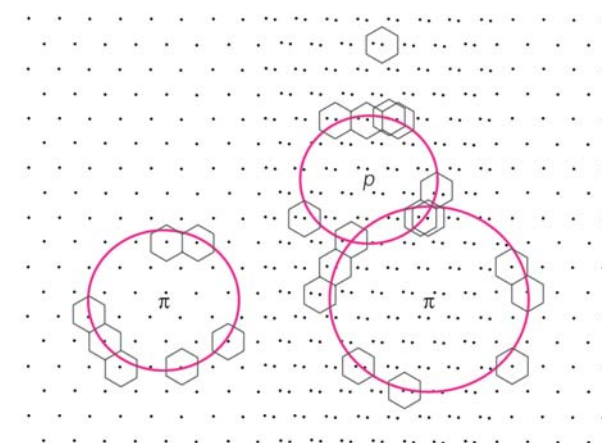
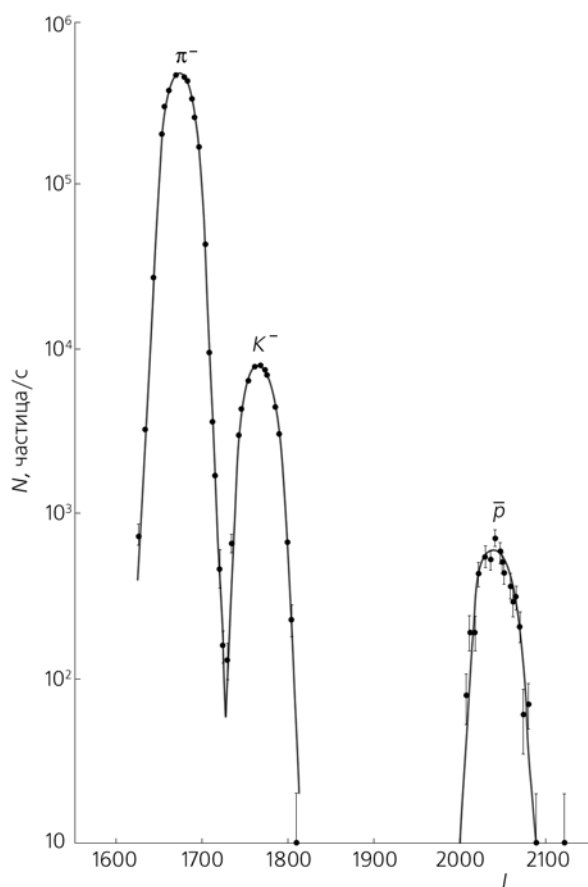


Рис.6. Кольца черенковского излучения от протона и двух π -мезонов, зарегистрированные в детекторе RICH [4]. Точками показаны центры ФЭУ в матрице, шестиугольниками — сработавшие ФЭУ.

Рис.5. Идентификация π^- , K^- -мезонов и антипротонов в пучке отрицательных частиц с импульсом 45 ГэВ/с при помощи дифференциального счетчика [2] с компенсацией дисперсии, наполненного CO_2 . l — число делений шкалы интерферометра, пропорциональное $(n-1)$.

к открытию масштабной инвариантности в образовании адронов [3].

Основные недостатки дифференциальных счетчиков — сильное ограничение на разброс частиц по углам и способность регистрировать в данный

момент только одну частицу. Поэтому они применяются, в основном, для идентификации частиц в хорошо сформированных пучках. Когда необходимо регистрировать частицы в большом интервале углов и/или одновременно несколько

частиц, применяют детекторы типа RICH.

Если траектория заряженной частицы не параллельна оси счетчика Z (рис.2), а имеет относительно нее угловые координаты θ_p , φ_p , то кольцо, в которое соберется черенковский

свет в фокальной плоскости сферического зеркала, сместится: его центр будет иметь полярные координаты $r_0 = R/2 \operatorname{tg}\theta_p$, $\varphi_0 = \varphi_p$ (рис.4). Таким образом, определив положение центра и радиус r кольца черенковского излучения, можно не только измерить скорость частицы, но и найти угловые координаты ее траектории, что и реализуется в счетчиках RICH (Ring Imaging Cherenkov). В них вместо кольцевой диафрагмы (рис.2) в фокальной плоскости помещаются приемники, способные эффективно регистрировать отдельные фотоны и измерять их координаты — например, ФЭУ с небольшим диаметром фотокатода. Один из первых счетчиков RICH, в котором для регистрации колец черенковского света использовалась матрица из 736 умножителей с диаметром фотокатода 10 мм, был создан в 1989 г. для экспериментов на ускорителе ИФВЭ [4]. На рис.6 показан случай, когда в матрице одновременно зарегистрированы три кольца. По радиусам колец были рассчитаны скорости соответствующих им частиц, и затем по известным импульсам, измеренным при помощи магнитного спектрометра, определены их массы покоя: две частицы оказались пионами и одна — протоном. Позднее в ИФВЭ был разработан и изготовлен 10-метровый счетчик RICH [5] с матрицей из 2848 ФЭУ для экспериментов в Национальной ускорительной лаборатории им.Ферми (ФНАЛ) в США. Счетчик заполнялся неоном при давлении 1 атм. Он позволял разделять пионы и каоны до энергий 185 ГэВ и пионы и протоны — до 320 ГэВ.

Регистрация колец черенковского излучения матрицей из большого числа ФЭУ имеет целый ряд достоинств, но вместе с тем делает RICH весьма дорогим прибором. Кроме того, точность определения координат фотона ограничена диаметром фотокатода ФЭУ. Дешевле вместо матрицы ФЭУ использо-

вать, например, дрейфовые проволочные камеры или газовые электронные умножители GEM [6], которые имеют очень хорошее координатное разрешение, но уступают ФЭУ по другим характеристикам, например, по временному разрешению.

Спектрометры полного поглощения

Измерение энергии и идентификация γ -квантов и электронов (позитронов) высокой энергии — важнейшие задачи в физике частиц. Это связано, в частности, с тем, что большинство частиц нестабильно, и многие из них через очень короткое время, не позволяющее зарегистрировать их непосредственно, распадаются в конечном счете на γ -кванты и электроны. В качестве примера можно привести распады π^0 - и η -мезонов на 2 γ -кванта или J/ψ^- , ψ^- , Υ -частиц и переносчика слабого взаимодействия Z^0 -бозона на электрон и позитрон. Указанные частицы играют фундаментальную роль в микромире, и многие эксперименты в физике высоких энергий направлены на изучение их свойств и закономерностей образования.

Единственный для γ -квантов и один из основных для электронов способ определения энергии в области больше нескольких ГэВ — метод полного поглощения электромагнитных ливней, создаваемых ими в веществе детектора. Рассмотрим, как возникают электромагнитные ливни.

Результатом взаимодействия ультрарелятивистских электронов и позитронов с атомными ядрами A среды чаще всего становится тормозное излучение фотонов:

$$e + A \rightarrow e' + A' + \gamma$$

(штрих означает изменение энергии частицы). Аналогично, самым вероятным процессом для γ -квантов с энергиями в де-

сятки МэВ и выше оказывается образование электрон-позитронных пар:

$$\gamma + A \rightarrow e^+ + e^- + A'.$$

Посмотрим, что случится при попадании, например, высокоэнергичного γ -кванта в очень толстый (≥ 40 см) слой оптического стекла, скажем, марки ТФ1 (тяжелый флинт). Пролетев в таком стекле примерно 2 см, γ -квант превратится в электрон и позитрон, которые, в свою очередь, на той же дистанции ~ 2 см потеряют около половины энергии на тормозное излучение. Тормозные фотоны, пролетев опять ~ 2 см, породят новые пары e^+e^- и т.д. Этот процесс лавинообразного размножения частиц и, следовательно, дробления их энергии будет продолжаться до тех пор, пока реакции тормозного излучения и рождения пар играют доминирующую роль. Затем, когда средние энергии частиц в ливне станут меньше так называемой критической энергии (для стекла ТФ1 она составляет ~ 20 МэВ), в дело вступят другие процессы (например, ионизационные потери энергии для электронов и позитронов), приводящие к уменьшению потока частиц. Образовавшиеся в веществе электроны, позитроны и γ -кванты и составляют электромагнитный ливень. Число частиц в ливне достигает максимума на глубине стекла $t = 15 \div 20$ см, а затем быстро уменьшается и при $t \geq 40$ см становится пренебрежимо малым. Легко сообразить, что ливень от первичного электрона или позитрона будет развиваться аналогично ливню от γ -кванта.

Естественно, ливневые электроны и позитроны излучают в стекле черенковский свет. Суммарная длина треков всех электронов и позитронов в ливне и, следовательно, число черенковских фотонов оказывается пропорциональным энергии первичной частицы. Таким образом, измерив при помощи фотоумножителя интенсивность вспышки черенковского

излучения в толстом блоке стекла, можно определить энергию частицы, вызвавшей ливень. Точность измерения энергии определяется формулой $\Delta E/E = 0.05\sqrt{E} + 0.01$, где E измеряется в ГэВ. При энергиях электронов и γ -квантов больше 25 ГэВ энергетическое разрешение становится лучше 2%.

Заметим, что для частиц с массой m интенсивность тормозного излучения $\sim 1/m^2$. Самая близкая по массе частица к электрону — мюон. Поскольку $m_\mu/m_e \approx 2 \cdot 10^2$, вероятность излучения тормозного γ -кванта мюоном почти в 40 000 раз меньше, чем для электрона, и он реально не вызовет развития электромагнитного ливня в стекле. И действительно, черенковский свет от мюона (обусловленный как излучением самого мюона, так и быстрыми электронами, выбитыми им из атомов в стекле) гораздо слабее, чем свет от электронов и γ -квантов высокой энергии. На этом основан принцип идентификации электронов и γ -квантов при помощи спектрометров полного поглощения.

В настоящее время широкое применение в экспериментах на ускорителях для регистрации электронов и γ -квантов нашли спектрометры полного поглощения типа ГАМС [7], разработанные в ИФВЭ под руководством Ю.Д.Прокошкина. Они представляют собой «стенки» из блоков особо прозрачного оптического стекла, как правило, марок Ф8 или ТФ1. Характерный размер блока $4 \times 4 \times 40$ см. Каждый блок «просматривается» своим ФЭУ. Наряду с энергией такие спектрометры позволяют измерять с высокой точностью координаты попадающих в детектор частиц (по распределению энергии ливня в поперечном направлении). Самый большой спектрометр ГАМС, созданный в ИФВЭ около 20 лет назад для экспериментов в ЦЕРН, содержит 4000 блоков стекла. Крупные спектрометры этого типа используются в

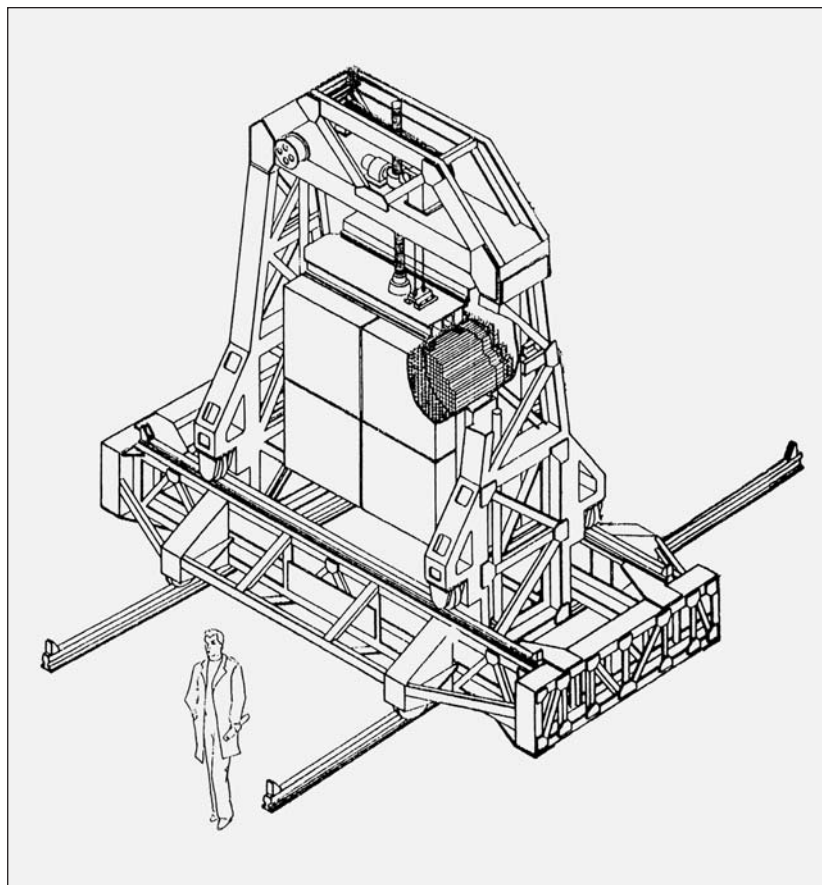


Рис.7. Общий вид детектора ГАМС-2000, используемого в экспериментах на ускорителе ИФВЭ.

ИФВЭ (рис.7), ФНАЛ и Брукхейвенской национальной лаборатории (США).

Регистрация космических частиц

Электромагнитные ливни могут развиваться не только в плотных средах, но и в газах, включая атмосферу Земли. Например, средний путь γ -кванта в воздухе до превращения в электрон и позитрон равен 390 м при давлении 1 атм. С точки зрения развития ливня атмосфера эквивалентна 50-сантиметровому блоку стекла ТФ1, и высокоэнергичные γ -кванты, попадающие в атмосферу из космоса, должны дать мощное черенковское излучение. Источниками таких γ -квантов служат далекие

звезды, и изучение энергетических спектров γ -квантов помогает лучше понять процессы, происходящие во Вселенной. Этим занимается молодая наука — гамма-астрономия.

Первые эксперименты по наблюдению черенковских вспышек от космических частиц были выполнены еще в 50-х годах прошлого столетия В.Голбрайтом и Дж.Джелли, а также Н.М.Нестеровой и А.Е.Чудаковым. Сейчас функционируют несколько крупных экспериментальных установок, на которых проводятся исследования в области гамма-астрономии. Черенковский свет в них регистрируется либо непосредственно ФЭУ с большими фотокатодами, либо детекторами, похожими на прожекторы. В фокусе прожекторных зеркал, имею-

щих диаметр до нескольких метров, располагаются чувствительные фотоприемники. Чтобы уменьшить фон от постороннего света и определить направление движения первичного γ -кванта, в одной установке используется ряд таких детекторов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, причем отбираются события, когда сигналы в детекторах появляются одновременно. Эксперимент, естественно, ведется только в безлунные ночи при прозрачной атмосфере.

Черенковское излучение сопровождает не только электромагнитные ливни, но и так называемые широкие атмосферные ливни, которые возникают при взаимодействии космических адронов высоких энергий с ядрами азота, кислорода и других компонентов воздуха. При этом обильно рождаются

π^0 -мезоны, которые быстро распадаются на два γ -кванта, вызывающих электромагнитные ливни. Благодаря регистрации черенковского излучения удается получать информацию о широком атмосферном ливне на всем пути его развития, тогда как другие методы позволяют исследовать характеристики ливня лишь на определенной глубине атмосферы.

Здесь нельзя не упомянуть космическую обсерваторию, носящую имя французского физика П.Оже, одного из пионеров исследования космических лучей. Обсерватория создается в Аргентине при сотрудничестве ученых из 19 стран. Ее основу составляют 1600 детекторов, расположенных через 1.5 км на площади 3000 км². Каждый детектор представляет собой цилиндр с основанием 10 м² и высотой 1.2 м, заполненный во-

дой. Черенковский свет, излученный в воде заряженными частицами широкого атмосферного ливня, собирается на полусферический ФЭУ с диаметром фотокатода 23 см. Помимо черенковских счетчиков в установке имеются детекторы для регистрации флуоресценции воздуха, вызванной взаимодействием заряженных частиц с атомами азота. Обсерватория нацелена на изучение ливней с предельно высокими энергиями $\geq 10^{20}$ эВ.

Но есть один тип космических частиц, которые очень слабо взаимодействуют с веществом и их нельзя зарегистрировать по ливням в атмосфере — это нейтрино. Изучение космических нейтрино представляет особый интерес, так как может дать информацию о процессах, происходящих в глубинах галактик и звезд, в частности вну-

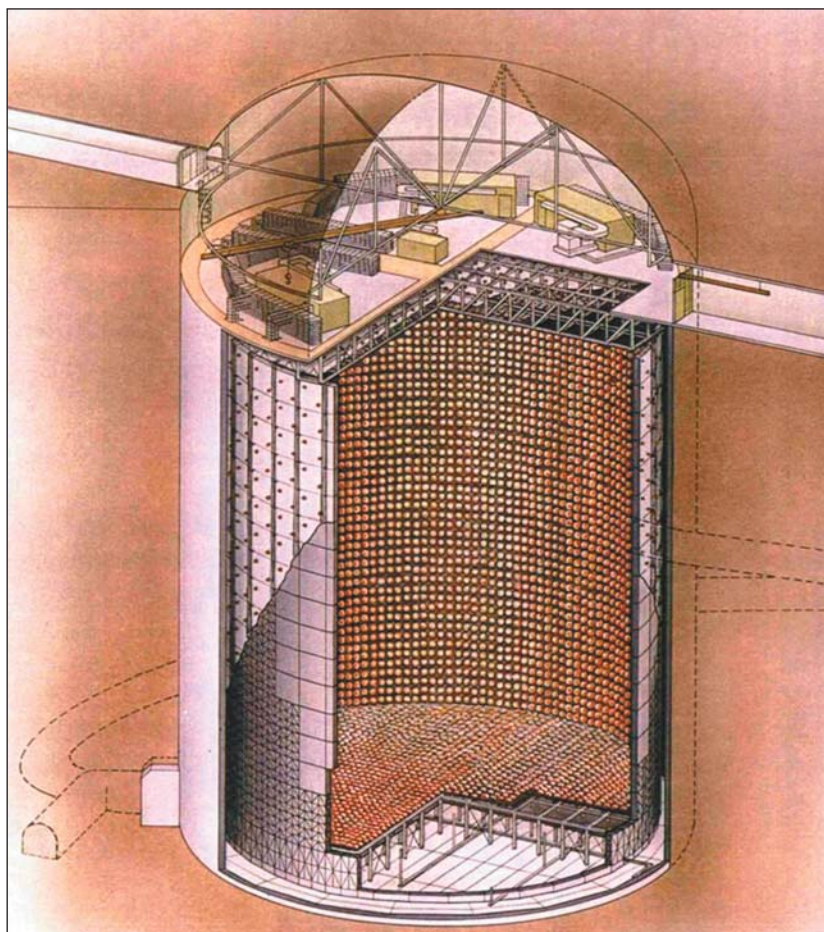
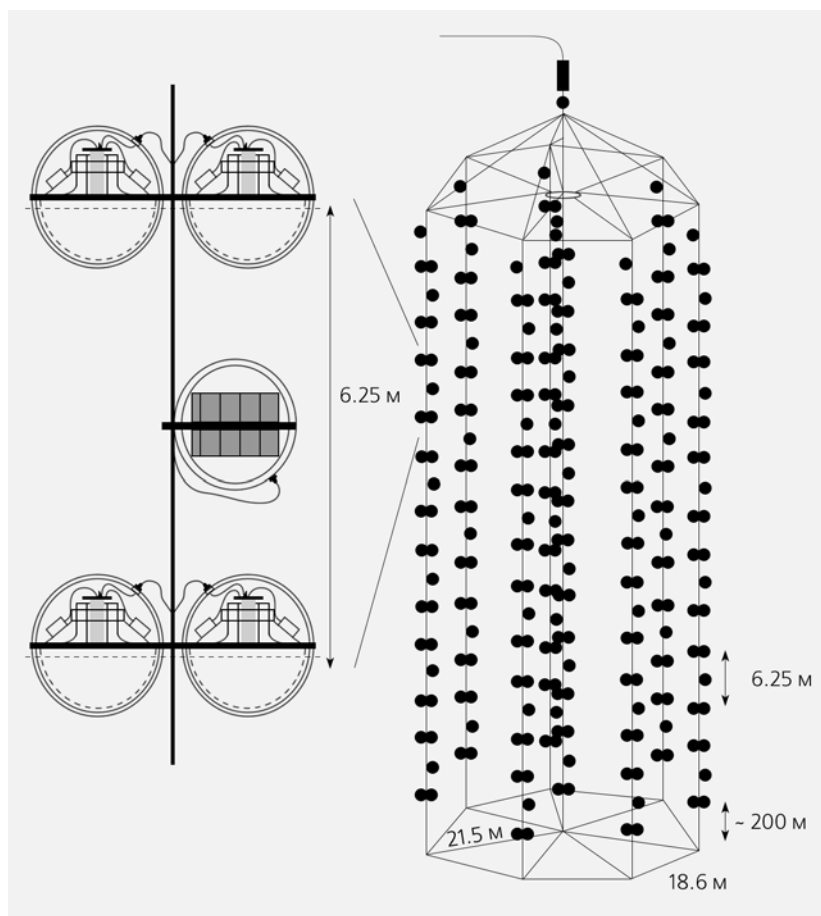


Рис. 8. Общий вид установки SuperKamiokande. 50 000 т очень чистой воды находятся в цилиндрическом резервуаре высотой 41.4 м и радиусом основания 20 м. Возникающий в воде черенковский свет регистрируется при помощи 11 000 полусферических ФЭУ с диаметром фотокатода 0.5 м.

Рис.9. Схема расположения детекторов черенковского излучения Байкальского нейтринного телескопа.



три Солнца. Это епархия еще одной новой науки — нейтринной астрономии. Чтобы «уловить» данные частицы, придется строить гигантские детекторы — весом в тысячи тонн и более — и помещать их глубоко под землей или под водой для снижения фона от всех других, менее проникающих, космических частиц. А регистрируется в данном случае все то же черенковское излучение — от вторичных заряженных частиц, возникших при взаимодействии нейтрино в воде (вода — самый дешевый, а иногда и бесплатный черенковский радиатор).

Крупнейший подземный водный детектор — SuperKamio-kande [8] (рис.8). Он расположен в глубокой шахте под горой Камиока в 300 км от Токио. Основные направления исследований связаны с регистрацией нейтрино: измерением потока

нейтрино от Солнца и изучением энергетического спектра нейтрино, которые возникли при взаимодействии космических лучей в атмосфере. В частности, данные, полученные на этой установке вместе с результатами опытов на другой подземной установке SNO (Канада), использующей тяжелую воду (D_2O), позволили обнаружить осцилляции солнечных нейтрино [9]. К сожалению, в 2002 г. на японской установке произошла авария, в результате которой вышло из строя значительное число дорогостоящих ФЭУ. В настоящее время установка восстанавливается, и скоро исследования на ней будут продолжены.

Байкальский нейтринный телескоп [10] — первый глубоководный детектор космических частиц. Выбор озера Байкал обусловлен большой глубиной (до 1.7 км) и прозрачностью во-



Рис.10. Монтаж гирлянды из ФЭУ в скважине, пробуренной в ледяном покрове Антарктиды.

ды. Кроме того, зимой оно покрывается толстым слоем льда, что упрощает монтаж установок. Черенковский свет от мюонов и взаимодействий нейтрино на больших глубинах регистрируется фотоумножителями, опускаемыми под воду на специальных тросах — стрингах (рис.9). Установка предназначена для исследования энергетических спектров нейтрино и мюонов, а также поиска новых частиц с необычными свойствами, которые могли бы прилететь из далеких миров. Сейчас строятся еще 3 глубоководных детектора — ANTARES, NESTOR и NEMO. Все они располагаются в Средиземном море у берегов Греции, Италии и Франции на глубинах от 2,4 до 4,1 км. Идея использования естественных водоемов для регистрации космических нейтрино была впервые сформулирована А.А.Марковым в 1960 г.

Кроме глубоководных существуют и наземные водные детекторы космических лучей. К ним относится, например, созданная в Московском инженерно-физическом институте установка НЕВОД, которая способна

регистрировать все основные компоненты космических лучей, включая прошедшие сквозь Землю нейтрино.

Не только вода, но и лед используется в качестве радиаторов черенковского излучения космических частиц. В Антарктиде были обнаружены многокилометровые слои прозрачного льда, и этим воспользовались физики для создания на Южном полюсе комплекса AMANDA [11]. Черенковский свет, возникший во льду, регистрируется несколькими гирляндами из фотоумножителей, опущенных в глубокие отверстия (рис.10). По сравнению с водой лед обладает целым рядом преимуществ: он неподвижен, в нем нет светящихся микроорганизмов, создающих фон на больших глубинах естественных водоемов, радиоактивный фон льда очень мал, низкая температура способствует уменьшению шумов ФЭУ. Сейчас недалеко от детектора AMANDA строится еще более грандиозное сооружение под названием ICECUBE, в котором «просматриваемый» объем льда составит 1 км³. Главное направление работ на установках

AMANDA и ICECUBE — нейтринная астрономия.

* * *

Черенковские счетчики играют исключительно важную роль в физике частиц. Именно они были основным инструментом в экспериментах на ускорителях по обнаружению и исследованию образования антивещества, изучению закономерностей рождения и взаимодействия ядерно-активных частиц — адронов, поиску новых частиц и процессов в микромире. Трудно переоценить и значение черенковских детекторов для регистрации космических лучей. Использование в качестве радиаторов черенковского излучения земной атмосферы, искусственных и естественных водоемов и антарктических льдов позволило создать уникальные по своим возможностям установки для исследований в области гамма- и нейтринной астрономии. Результаты этих работ существенно расширили наши знания о процессах образования и свойствах космических частиц, в частности нейтрино. ■

Литература

1. Duteil P., Gilly L., Meunier R. et al. // Rev. Sci. Instrum. 1964. V.35. P.1523—1524.
2. Бушин Ю.Б., Горин Ю.П., Денисов С.П. и др. // ПТЭ. 1971. №1. С.65—67.
3. Бинон Ф., Денисов С.П., Дютель П. и др. // ЯФ. 1970. №11. С.636—639. Phys.Lett. 1969. B30. P.506—509.
4. Kozhevnikov A., Kubarovsky V., Molchanov V. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1999. V.A433. P.164—167.
5. Engelfried J., Filimonov I., Kilmer J. et al. // Nucl. Instr. Meth. V.A431. P.53—69.
6. Sauli F. // Nucl. Instr. Meth. 1997. V.A386. P.531—534.
7. Binon F., Buyanov V.M., Donskov S.V. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1986. V.A248. P.86—102.
8. Fukuda S., Fukuda Y., Hayakawa J. et al. (SuperKamiokande Collaboration) // Nucl. Instr. Meth. 2003. V.A501. P.418—462.
9. Копылов А.В. Солнечные нейтрино: новые результаты // Природа. 2004. №2. С.5—11.
10. Arpesella C., Bellotti E. and Bottiro F. // Nucl. Phys. (Proc. Suppl). 1994. V.B35. P.290—293.
11. Halzen F. // Nucl. Phys. (Proc. Suppl). 1995. V.B38. P.472—483.

Физики и лирики

Б.М.Болотовский,
доктор физико-математических наук
Физический институт им.П.Н.Лебедева
Москва

Более 40 лет прошло с того дня, как Нобелевский комитет присудил премию трем советским физикам — П.А.Черенкову, И.Е.Тамму и И.М.Франку — за открытие и объяснение очень красивого физического явления. Открытие было сделано в 1934 г. — задолго до присуждения Нобелевской премии. Годы позволяют оценить значение сделанного в прошлом. Но такой разрыв во времени между открытием и наградой имеет и свои отрицательные стороны. Не все участники открытия получают признание при жизни. Нобелевская премия посмертно не присуждается. С.И.Вавилова уже не было в живых в год присуждения премии — он умер за семь лет до этого.

В том же самом 1958 г. Нобелевская премия по литературе была присуждена знаменитому советскому поэту и писателю Б.Л.Пастернаку — за роман «Доктор Живаго» и стихи к нему. Роман прекрасен, а стихи еще прекраснее, и Пастернак, без сомнения, был достоин Нобелевской премии. Но в романе «Доктор Живаго» были высказаны (иногда от имени автора, а чаще — от лица героев романа) взгляды, в общем довольно безобидные, которые, тем не

менее, расходились с официальной партийной идеологией. Поэтому роман впервые вышел на Западе. Присуждение Пастернаку Нобелевской премии было воспринято советским руководством как диверсия против страны победившего социализма. Началась массивированная травля Пастернака.

Присуждение же премии физикам было встречено партийным руководством как большая победа. Во всех газетах помещались статьи о советской науке, о существе и значении открытия, о физиках, которые удостоены премии. В газете «Правда» была напечатана статья, подписанная сразу несколькими академиками. Писал ее Б.М.Вул, тогда член-корреспондент АН СССР и заведующий лабораторией полупроводников ФИАН, в стенах которого было сделано открытие. С черновиком этой статьи Бенцион Моисеевич приходил ко мне. Написав, Вул хотел быть уверенным, что она не содержит физических неточностей. Помню, Бенцион Моисеевич держался таинственно, завел меня для чтения в пустой кабинет и вздрагивал при каждом стуке. Если говорить о физической стороне, статья не вызвала у меня возражений. Я только посоветовал добавить фразу о том, что на советских искусственных спутниках Зем-

ли установлены специальные приборы для исследования многозарядных ионов — черенковские счетчики, в которых космические частицы регистрируются по излучению Вавилова—Черенкова. Вул такую фразу добавил.

Кроме того, я предложил воспользоваться случаем и напомнить о замечательном физике, выдающемся учителе, основателе большой и плодотворной научной школы академика Л.И.Мандельштаме. Через несколько лет после смерти Мандельштама его обвинили в идеализме, рассыпали на этом основании том его трудов, преследовали его учеников. Я предложил вставить в статью, посвященную нобелевским лауреатам, фразу (пишу по памяти): «Робота, удостоенная Нобелевской премии, есть результат плодотворного сотрудничества двух замечательных научных школ — экспериментальной школы академика Вавилова и школы теоретической физики академика Мандельштама». Вул согласился. Через день статья появилась в «Правде» за подписью нескольких академиков. Все, что печаталось в газете «Правда», воспринималось как непререкаемая истина. Нападки на Мандельштама прекратились. Спасибо Нобелевскому комитету. Не дали в свое время Леониду

© Болотовский Б.М., 2004



И.Е.Тамм, П.А.Черенков и И.М.Франк. Стокгольм, ноябрь 1958 г.



Б.Л.Пастернак. 1920 г.

Исааковичу Нобелевскую премию за открытие комбинационного рассеяния, так хоть помогли избавить его от посмертного шельмования.

Поскольку я в то время занимался теорией излучения Вавилова—Черенкова, дирекция института поручила мне встречаться с корреспондентами, репортерами, фотографами и писателями, которые готовили материалы по Нобелевской премии. Самых лауреатов было решено беспокоить как можно меньше.

Работники пера имели весьма смутное представление о существе открытия и нередко писали полный бред. Мои робкие замечания они встречали в штыки, упрекали в узости кругозора, в том, что я не понимаю специфику художественного творчества. Выказывались намеки, что мои «придирки» вызваны желанием получить от автора взятку за одобрение материала.

Пришел в эти дни в институт писатель, успевший написать книжку для школьников о замечательном открытии. Он оста-

вил мне рукопись для ознакомления. В книжке рассказывалось, как Черенков в лаборатории изучал поведение жидкостей под воздействием гамма-излучения. Процесс открытия описан был так: «Неожиданно Черенков увидел, как из воды показался синий конец». Я уже много чего начитался об открытии, был знаком с немалым числом поэтических вольностей, но «синий конец» поставил меня в тупик. Всякая попытка наглядно представить себе, о чем писал автор, приводила к картинкам, не имевшим ничего общего с физикой. Когда мы встретились с автором, я его спросил:

— Что вы имели в виду, когда писали, что Черенков увидел синий конец?

Автор заволновался:

— Где конец? Какой конец? Покажите!

Я ему показал фразу. Он прочитал и с явным облегчением сказал:

— Это машинистка напутала. Не конец, а конус.

Следовательно, по мысли автора, Черенков увидел в воде си-

ний конус. На самом деле Черенков в условиях опыта никакого конуса не видел и не мог видеть. Я об этом сказал писателю. Тот ответил:

— Детям нужны понятные объяснения.

— Но это же неверное объяснение, — пытался я возразить.

— Зато понятное, — отрубил автор.

Что было делать? Как правило, автор, когда я пытался исправить неверное высказывание в его очерке, отказывался вносить предлагаемое исправление:

— Я буду писать так, как считаю нужным, а вы можете писать, как вы хотите. И я заработаю, и вы заработаете.

Мой голос был совещательный. Что авторы хотели, то и писали. Душа моя была уязвлена многочисленными искажениями физического смысла.

Прошло несколько дней моей деятельности в качестве секретаря по вопросам печати. Както мне на работу позвонил мой однокурсник по университету Глеб Анфилов. Он стал писателем-фантастом, и я иногда встречал в печати его рассказы.

Глеб предложил мне написать «беседу» об открытии для всеобщего радиокomiteта. Мог бы он и сам написать, ведь у него было высшее образование по физике, но предложил это сделать мне.

— Ты этим занимался, ты хорошо напишешь, — сказал он.

Я сомневался, что смогу, но Глеб меня уговорил. Я не знал, каким требованиям должна удовлетворять «беседа» на радио. Глеб предложил встретиться и вместе пойти в радиокomiteт, пообещал познакомить с редактором, который сможет ответить на все мои вопросы. Так и договорились.

В назначенный день мы с Глебом пришли в здание радиокomiteта на Пушкинской площади. Глеб познакомил меня с редактором. Если правильно помню, фамилия редактора была Жардинье. Сначала этот человек мне понравился. Он поговорил со мной, расспросил о некоторых подробностях открытия, а потом сказал:

— Если вы напишете все, что сейчас мне рассказали, это будет хорошая «беседа».

Он усадил меня за свободный стол в комнате, где сидели несколько сотрудников, и ушел, пообещав вернуться через полчаса. Глеб Анфилов распрощался со мной и тоже ушел.

Редактор пришел через час. Я уже все написал, сидел и ждал. Сотрудники не обращали на меня никакого внимания. Редактор забрал два исписанных листочка и опять ушел, наверное, понес текст своему начальству. На этот раз он отсутствовал минут десять. Когда он вернулся, по его виду я определил, что статья получила одобрение высокого начальства.

— Вы прирожденный популяризатор, — сказал он с улыбкой. — Статья пойдет, и мы рассчитываем на дальнейшее сотрудничество. Ваша «беседа» будет прочитана по радио тогда-то (он назвал время). А конец мы сами допишем, это вас пусть не беспокоит.

— Какой конец? — тупо спросил я, не понимая еще всей опасности.

— Конец про Пастернака.

Я не понимал (а мог бы понять), что мало было только похвалить советских физиков и рассказать о значении их открытия. Надо было тут же еще и обругать Пастернака, а также и Нобелевский комитет, который пошел на поводу у поджигателей холодной войны и присудил премию за антисоветский роман, не имеющий никаких литературных достоинств. В газетах и журналах тех дней большинство материалов, посвященных Нобелевской премии по физике за 1958 г., а вернее почти все материалы, заканчивались рассуждениями такого рода: присуждение Нобелевской премии советским физикам есть дело вполне справедливое и заслуживающее одобрения, а вот премия «литературному сорняку» Пастернаку за антисоветский роман есть обреченная на заведомый провал диверсия против сил мира и социализма. Осуждая Пастернака, советские люди были единодушны, тем более, что никто из них не читал (и не мог прочесть) роман «Доктор Живаго». Те, у кого при обыске обнаруживали текст, получали три года лагерей. Роман был издан в Советском Союзе только лет через двадцать пять после описываемых событий, и тогда появилась горькая шутка: выпустили, наконец, роман «Доктор Живаго» и тех, кто его читал. Но это произошло много позже. В то время доступа к роману не было. А у тех, кто его не читал, даже малейших сомнений не могло возникнуть, что «Доктор Живаго» — это злонамеренная антисоветская стряпня, беспомощная в литературном отношении. Логика рассуждений была такая же, как у одного из героев в романе Анатolia Франса «Остров пингвинов»: бездоказательное высказывание не может быть подвергнуто сомнению. Если бы в подтверждение приводились какие-то доказательства, их, при нали-

чие сомнения, можно было бы проверить. А раз доказательств нет, то и сомневаться не в чем.

Вот и я должен был в конце своей «беседы», написанной для радио, осудить Пастернака. В тексте, который я передал редактору, такого осуждения не было. Редакция радиокomiteта бралась сама добавить необходимое. Но мне этого очень не хотелось.

— А надо ли смешивать большое научное достижение с грязным политическим скандалом? — спросил я.

— Надо, надо, — сказал редактор в ответ на мои сомнения. — Радио — это пропаганда.

В нашем дальнейшем разговоре я старался его убедить, что Нобелевская премия по физике не имеет никакого отношения к Нобелевской премии по литературе, а в написанной мной «беседе» речь идет о физике и о физиках, и я не хочу вставлять никаких высказываний о литературе вообще и Пастернаке в частности. Редактор отвечал, что и Пастернак, и его роман заслуживают осуждения, весь советский народ его (Пастернака) осуждает и это необходимо вставить в написанную мною «беседу». Он несколько раз повторил: «радио — это пропаганда» и «радио — это политика». Сотрудники, сидевшие в комнате, прекратили разговоры между собой и внимательно слушали наш разговор.

Наконец, я сказал, что если редакция настаивает, чтобы я вставил в «беседу» осуждение Пастернака, то я предпочитаю забрать свою работу.

— Какой вы несговорчивый, — сказал редактор. — Ну, давайте сделаем так: мы прочтем вашу «беседу», потом сделаем паузу, а потом другим голосом — я подчеркиваю, другим голосом — скажем про Пастернака.

— Голосом Пастернака, — сказал один из сотрудников, видом помоложе.

Редактор не обратил на высказывание никакого внимания. Или сделал вид, что не обратил.

Я же настаивал, что не хочу добавлять никаких высказываний такого рода, ни с паузой, ни без паузы.

— Ладно, — сказал, наконец редактор, — не хотите — не надо. Хозяин — барин.

Он сообщил мне день и час, когда будет передача с моей «беседой», и мы распрощались.

У меня от всей этой истории осталось чувство смутной тревоги, возможного подвоха — не вполне осознанное беспокойство. Несмотря на слова редактора, я все же опасался, что в текст «беседы» будут вставлены слова, осуждающие Пастернака. А я не только не хотел его ругать, я ему сочувствовал. Уж очень беспощадной была травля, развязанная против него в печати и на радио.

В назначенный день и час я заранее сел к репродуктору, чтобы проверить, не изменили ли на радио мой текст. Но оказалось, что в указанное время шла другая передача. Видимо, редактор, сообщая мне день и час, что-то перепутал или в программе произошли изменения. Так я и не услышал своей «беседы».

Через пару дней мне позвонил редактор и спросил, слушал ли я «свою» передачу и каково мое впечатление. Узнав, что мне не удалось ничего послушать, удивился и обещал, если еще раз будут транслировать эту передачу, сообщить заранее. Больше он мне не звонил.

Оказалось, что, как правило, мало кто из моих знакомых слу-

шал радио, а из тех немногих, кто это делал, не было никого, кто бы прослушал «беседу».

Опросил я человек шесть, и безрезультатно. Седьмой же, когда я к нему обратился, сказал:

— Так, так. По ФИАНу ходит слух, что якобы Болотовский подходит по очереди ко всем сотрудникам и хвастается, что написал «беседу» для радио.

Мои объяснения никак его не разубедили. Пришлось прекратить расспросы.

Надежда на выяснение, как это нередко бывает, пришла со стороны. Милочка, жена моего брата Володи, сказала, что какая-то женщина у нее на работе слушала передачу, где речь шла о Болотовском.

— Там говорилось, что Болотовский получил Нобелевскую премию.

Я Милочке объяснил:

— Это не Болотовский получил Нобелевскую премию, а наши физики. Ты узнай, не говорилось ли в той передаче про Пастернака.

Милочка узнала и на следующий день сообщила:

— В той передаче говорилось про Пастернака.

— Что именно говорилось?

— Пастернак тоже получил Нобелевскую премию.

— Ты узнай, ругали Пастернака или нет.

Милочка продолжила расследование и назавтра доложила:

— В тот день Пастернака столько раз ругали по радио, что она не помнит, ругали его в передаче про физиков или нет.

И эта моя попытка выяснить положение дел окончилась неудачей.

Прошло еще две недели, прежде чем я узнал, наконец, горькую правду. Вернулся из длительной командировки сотрудник нашего института С.Аксенов. Я дружил с ним и его женой З.Чижиковой. Сережа провёл около месяца в Горьком. Приходя с работы в гостиницу, он иногда включал в своем номере репродуктор. И вот в один из дней он услышал мою «беседу». Как сказал мне Сережа, в конце «беседы» без всякой паузы и тем же голосом была произнесена стандартная уже к тому времени ругань в адрес Пастернака. Что в точности было сказано, Сережа не помнил, и я этого уже, по всей видимости, никогда не узнаю.

Я очень переживал тогда (и до сих пор переживаю), что дал себя обмануть. Потом думал над тем, есть ли способ, с помощью которого можно было бы этого избежать, возможно, потребовать, чтобы я сам зачитал свой текст. Тогда бы ничего не смогли добавить. Но вовсе не очевидно, что меня допустили бы к микрофону — ни голос мой, ни дикция не были подходящими для радио. В конце концов я пришел к выводу, что не надо мне было с самого начала ввязываться в это дело. Все же прав был редактор. Радио — ни в коем случае не информация. Радио — это политика и пропаганда. Так было в те годы. Так и осталось. ■



Роль органического вещества почв в миграции тяжелых металлов

В.В.Добровольский

Существует немного природных образований, так же широко распространенных на поверхности Земли, как почвенный гумус, представление о химическом строении которых было бы столь неопределенно. С уверенностью можно говорить лишь о химическом составе отдельных компонентов гумуса, различающихся растворимостью. Соотношение их в разных типах почв существенно изменяется. По-видимому, это обусловлено тем, что почва, являясь, по выражению В.И.Вернадского [1], биокосным телом, служит важнейшей средой при формировании и дальнейшей трансформации органического вещества нашей планеты. Органическая часть почвы постоянно возобновляется и преобразуется, чутко реагируя на изменение природно-зональных условий.

Исторически сложилось, что на протяжении 200 лет изучение гумуса развивалось преимущественно в агрохимическом аспекте в связи с проблемой почвенного плодородия. Лишь в середине XX в. органическое вещество почвы попало в сферу пристального внимания геохимиков. При этом было обнаружено, что гумусовые вещества активно влияют на миграцию



Всеволод Всеволодович Добровольский, доктор географических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой геологии и геохимии ландшафтов географического факультета Московского государственного педагогического университета. Автор более 20 научных монографий, учебников для высшей школы, научно-популярных книг. За работы в области биогеохимии рассеянных химических элементов удостоен золотой медали им.В.И.Вернадского Российской академии наук.

химических элементов, в частности, тяжелых металлов. Последние занимают особое положение в биосфере. Они не принимают участие в образовании тканей, как углерод, азот или фосфор, но входят в состав витаминов, ферментов, гормонов, выполняющих функции биокаллизаторов и биорегуляторов важнейших физиологических процессов. Даже ничтожные содержания металлов в живых организмах должны поддерживаться на необходимом уровне. Вместе с тем, металлы — важный

фактор развития мировой цивилизации. Одновременно с прогрессирующим ростом производства происходило неуклонное насыщение биосферы металлами. Негативные последствия повышения концентрации тяжелых металлов в окружающей среде дают основания отнести их к категории приоритетных загрязнителей.

Выяснение закономерностей мобилизации и миграции тяжелых металлов в биосфере представляется одной из актуальных научных проблем.

© Добровольский В.В., 2004

Место почвы в миграционной системе биосферы

Среди миграционных процессов в биосфере наиболее изучен так называемый биологический круговорот, под которым подразумевается циклический обмен масс химических элементов почвы и растительности. Количество металлов, участвующих в биогеохимической миграции, внушительно: массы цинка и меди, ежегодно вовлекаемые в такой круговорот на всей площади мировой суши, оцениваются миллионами тонн, никеля и свинца — сотнями тысяч, ртути и кадмия — тысячами тонн.

Другой мощный массопоток тяжелых металлов обусловлен водным стоком. Атмосферные осадки, промывая почвенную толщу и смывая с ее поверхности мелкие частицы, одновременно вовлекают в водную миграцию тяжелые металлы. Количество некоторых из них, выносимое реками на протяжении года, столь велико, что превышает их мировую добычу. Но не вся масса металлов может быть захвачена растительностью в биологический круговорот. Если бы их остаточные количества не удалялись за пределы суши, то в течение непродолжительного времени наземные экосистемы переполнились активными формами тяжелых металлов, что имело бы пагубные последствия для живых организмов.

В миграционной системе биосферы особое место занимает почва, в которой зарождаются главные массопотоки металлов. С одной стороны, здесь происходит мобилизация тяжелых металлов, находящихся в рассеянном состоянии, с другой — перераспределение их масс, непрерывное высвобождение из растений, микроорганизмов, разрушающихся горных пород. Благодаря равновесию между физико-химическими условиями и различными формами нахождения

рассеянных металлов, а также их способности включаться в ту или иную миграцию, не только поддерживаются миграционные потоки, но и регулируется их накопление.

Избыточное количество металлов путем трансформации их форм выводится в твердую фазу почвы, где они могут концентрироваться и в дальнейшем пополнять отдельные миграционные потоки. Для понимания механизмов мобилизации и саморегуляции масс металлов при водном перемещении, прежде всего, необходимо изучить их миграционные формы, большая часть которых образуется в почве.

Закономерности водной миграции тяжелых металлов

Начало изучению миграционных форм металлов было положено определением металлов в водах рудных месторождений. При окислении сульфидных руд образуются легко растворимые соединения металлов — сульфаты, бикарбонаты, хлориды. В водах, омывающих рудные залежи, постоянно присутствуют ионы Zn^{2+} , Cu^{2+} и др., которые в конечном итоге поступают в реки и мигрируют за пределы суши. Один из патриархов геохимии В.М.Гольдшмидт полагал, что законы ионных растворов определяют главные черты водной миграции химических элементов на поверхности Земли [2].

Углубленное изучение таких ионных систем показало, что нахождение ионов металлов в растворе ограничивается определенными физико-химическими параметрами, за пределами которых металлы образуют нерастворимые соединения и выпадают в осадок. Американские геохимики У.Крамбейн, Р.Гаррелс, К.Крайст [3, 4] еще в середине прошлого века теоретически рассчитали поля существования ионов разных ме-

таллов в растворах. Казалось, ключ к пониманию закономерности водной миграции найден.

Но вскоре обнаружилось, что законы ионных равновесий, справедливые для сравнительно высоких концентраций металлов в рудных водах, с трудом применимы для объяснения миграции ничтожных их количеств в реках. Среди водорастворимых соединений металлов в речных водах присутствуют не только простые ионы, но и комплексные. Так, например, цинк образует не только ион Zn^{2+} , но также $[ZnOH]^+$; $[Zn(OH)_3]^-$; $[ZnCl]^+$; $[Zn(SO_4)_2]^{2-}$ и др. Физико-химические условия нахождения таких водорастворимых форм различаются. В результате, цинк может присутствовать в речных водах повсеместно.

Кроме того, значительная часть металлов входит в состав водорастворимых комплексных органических соединений, сохраняющихся в растворе в очень широком диапазоне окислительно-восстановительных условий. Исследования Г.М.Варшал и др. [5] показали, что многие растворимые органические соединения, существующие в речных водах, представляют собой определенные почвенные гумусовые кислоты.

Сначала внимание ученых было сосредоточено преимущественно на изучении концентрации тяжелых металлов в природных водах различных типов. Но в 60—70-х годах XX в. российские и американские литологи и океанологи, исследуя химический состав речных вод, обнаружили, что, несмотря на незначительную концентрацию, количество металлов, мигрирующее с речным стоком, весьма значительно. По данным В.В.Гордеева и А.П.Лисицына [6], массы цинка, меди, никеля, ежегодно выносимые реками, составляют миллионы тонн. К тому же более 90% всех металлов, участвующих в водной миграции, представлено водонерас-

творимыми формами. Парадоксальный, на первый взгляд, факт объясняется тем, что большая часть металлов связана с тонкими почвенными частицами, образующими речные взвеси.

Водорастворимые формы

Для фракционирования тяжелых металлов, накапливающихся в почвах, потребовались нестандартные методические решения. Полное отделение металлов, связанных с мельчайшими частицами коллоидных взвесей, достигалось диализом водных почвенных растворов. Затем диализат подвергался электродиализу. В полученных фракциях металлы определялись методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Результаты многочисленных экспериментов показали, что электронейтральные и отрицательно заряженные соединения металлов значительно превосходят по количеству те, что находятся в форме катионов. Следовательно, представление о том, что главная водорастворимая миграционная форма металлов — катионы, не подтвердилось.

Первые же экспериментальные исследования установили, что большая часть водорастворимых форм металлов — их комплексные соединения с растворимыми гумусовыми кислотами (фульвокислотами). С помощью гель-хроматографического анализа удалось обнаружить, что одни металлы (в частности, цинк) тяготеют к соединению с низкомолекулярными (молекулярной массой около 6000—8000) гумусовыми кислотами, другие (как, например, медь) — с высокомолекулярными (молекулярной массой около 18 000—27 000).

Чтобы понять, как формируются миграционные потоки тяжелых металлов в биосфере, мы определяли основные водорас-

творимые соединения тяжелых металлов в водных растворах почв практически во всех природных зонах: от арктических тундр до экстрааридных пустынь Центральной Азии. Для ориентировочной оценки содержания комплексных соединений металлов с водорастворимыми гумусовыми кислотами одновременно определялось и содержание водорастворимого органического углерода. Оказалось, что его количество закономерно уменьшается от нескольких сотен мг/кг в почвах тундровой и лесной зон Европейской части России до нескольких единиц мг/кг в серобурых почвах пустыни Гоби.

В той же последовательности уменьшается и количество тяжелых металлов. Так, например, концентрация цинка снижается от нескольких мг/кг в подзолистых почвах лесной зоны до сотых долей мг/кг в почвах пустыни. При этом, независимо от суммы всех водорастворимых форм металлов, катионов значительно меньше, чем анионов и электронейтральных молекул [7].

Водонерастворимые формы

Как ни важна миграция водорастворимых форм, основная масса тяжелых металлов, выносимых речным стоком, связана с водонерастворимыми соединениями. Минеральная часть почвы состоит из компонентов двух фракций: мелкообломочной и высокодисперсной. Граница между ними проходит в интервале 0.002—0.004 мм. Здесь могут присутствовать как наиболее мелкие обломочные компоненты, так и наиболее крупные из высокодисперсных.

Среди мелкообломочных, как правило, преобладает кварц — наиболее устойчивый к воздействию процессов почвообразования и выветривания. Другие обломочные минералы — полевые шпаты, слюды,

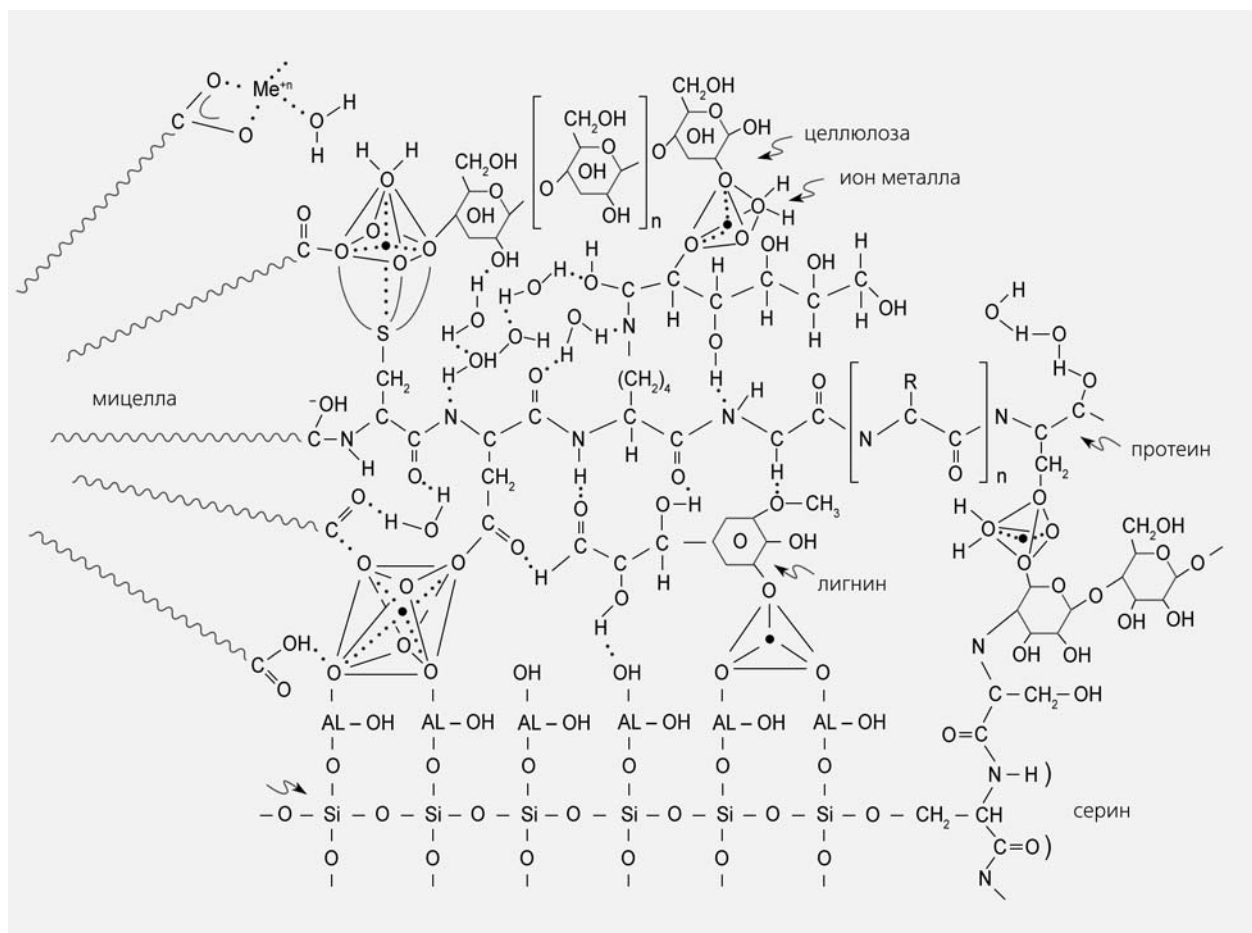
железomagнезиальные силикаты, кремни — обычно не превышают 10%. Количество тяжелых металлов, содержащихся в этой фракции, крайне незначительно, меньше, чем в почве в целом. Они входят в кристаллическую структуру минералов и освобождаются по мере их разрушения.

Высокодисперсная фракция состоит из минералов, обладающих слоистой кристаллической структурой, в которой слои соединены между собой менее прочно, чем ионы в структурах обломочных минералов. Такая особенность данных минералов способствует сорбции рассеянных тяжелых металлов, и концентрация их в этой фракции выше, чем в мелкообломочной и в почве в целом.

Высокодисперсная фракция обычно изучается методом рентгеноструктурного анализа. В ее состав входят минералы группы смектитов, сильно набухающие при насыщении их этиленгликолем и сжимающиеся при нагревании до 550°C; гидрослюды, межплоскостные расстояния у которых остаются стабильными при насыщении этиленгликолем и при нагревании, и минералы группы каолинита с пониженной способностью к сорбции. Члены второй и особенно первой групп активно фиксируют ионы металлов и их органические соединения.

Детальное изучение фракционного состава высокодисперсных частиц показало, что в нижних горизонтах почвенного профиля преобладают частицы размером от 0.8 до 1.5 мкм. При почвообразовании происходит их измельчение и аморфизация. Поэтому в верхнем (гумусовом) горизонте почв сильно возрастает содержание рентгеноаморфных частиц размером менее 0.1 мкм.

С помощью растрового электронного микроскопа, при увеличении более чем в 3000 тыс. раз, можно видеть, что чешуйки глинистых минералов разме-



Один из вариантов нахождения ионов тяжелых металлов (мелкие черные кружки) в комплексе гуминовой кислоты с высокодисперсным глинистым минералом. На схеме показаны возможные типы координации металлов [10].

ром 0.8–1.2 мкм образуют субпараллельные сростания, которые агрегированы в сильнопористую массу. Матовая поверхность отдельных чешуек и их сростаний говорит о том, что на них накапливаются аморфные вещества, по-видимому, водонерастворимые гумусовые соединения.

В черноземно-степных почвах сростания сильно агрегированы, в микропустотах присутствует субкристаллический кальцит. В почвах подзолистого типа глинистые минералы агрегированы в меньшей степени, а в порах нередко наблюдаются скопления рентгеноаморфных гидроксидов трехвалентного железа.

Гумусовые кислоты

Важная роль в структурной организации минерального вещества принадлежит активной части почвенного гумуса — гумусовым кислотам. При этом действие двух главных групп гумусовых кислот — фульвовых и гуминовых, — обладающих неодинаковой растворимостью, существенно различается.

Ионы металлов, сорбированные на поверхности почвенных частиц, могут образовывать комплексные соединения с фульвокислотами и в этой форме переходить в раствор.

Водонерастворимые гуминовые кислоты еще более активно соединяются с тяжелыми метал-

лами и выводят их из раствора в твердую фазу почвы. В свою очередь, гуминовые кислоты сорбируются высокодисперсными минеральными частицами, и тяжелые металлы оказываются закрепленными в их пленках и ступках. Подобные пленки склеивают отдельные частички с образованием микроагрегатов.

В прозрачных шлифах, приготовленных из почвы без нарушения ее строения, хорошо видно, что желто-бурые пленки и ступки пропитывают минеральное вещество. Их часто принимают за гидроксиды железа. Но с помощью иммерсионного метода под микроскопом легко устанавливается, что по-

казатель преломления бурых пленок значительно ниже, чем гидроксидов железа, и соответствует показателю преломления гуминовых кислот. Вместе с тем, благодаря высокому содержанию железа в почве, его концентрация в гуминовых пленках несравнимо больше, чем других металлов.

Гуминовые кислоты с разной молекулярной массой и растворимостью отличаются взаимодействием с почвенными минералами [8, 9]. Их структурные соотношения с высокодисперсными минеральными

частицами сложны и недостаточно изучены. Одна из моделей связи молекулы гуминовой кислоты с обладающим кристаллической структурой дисперсным минералом и коллоидной частицей показана на рисунке.

Миграционные формы металлов, образованные разными группами (фракциями) гуминовых кислот, также различаются по свойствам, что отражается на формировании миграционных потоков. В частности, почвенные частицы, сорбированные низкомолекулярными гумино-

выми кислотами, быстрее дезагрегируются и легче переходят в состав высокодисперсных речных взвесей.

Чтобы понять закономерности водной миграции тяжелых металлов в биосфере, необходимо провести сравнительное изучение водонерастворимых миграционных форм тяжелых металлов в почвах главных природных зон мира. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 02-04-48108.

Литература

1. Вернадский В.И. Биосфера. Л., 1926.
2. Goldschmidt V.M. Geochemistry. Oxford, 1954.
3. Krumbein W.C., Garrels R.M. // J. Geol. 1959. V.60. P.1—33.
4. Гаррелс Р., Крайст К. Растворы, минералы, равновесие. М., 1968.
5. Варшал Г.М., Кощеева И.Я., Сироткина И.С. // Геохимия. 1979. №4. С.598—607.
6. Гордеев В.В., Лисицын А.П. // Докл. АН СССР. 1978. Т.238. №1. С.225—228.
7. Добровольский В.В. // Почвоведение. 1997. №4. С.431—441.
8. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М., 1990.
9. Тейт Р. Органическое вещество почвы. М., 1991.
10. Nesi N. Metal-humic substance complex in the environment // Biogeochemistry of trace metals / Ed. D.C.Adriano. Boca Raton, Ann Arbor, 1992. P.429—496.

Судя по результатам генетического анализа, необходимо выделить в отдельный подвид слонов с о.Калимантан (Борнео), которые отличаются от индийских меньшими размерами тела, более крупными ушными раковинами, более длинным хвостом и менее изогнутыми бивнями. Специалисты предполагают, что отделение этого подвида произошло около 300 тыс. лет назад.

Terre Sauvage. 2003. №189. P.16 (Франция).

В 80 захоронениях уезда Ляньчэн (Внутренняя Монголия, Китай) археологи нашли предметы, изготовленные еще до периода Сражающихся царств (примерно 475—221 гг.

до н.э.). Наибольший интерес вызывают бронзовые зеркала, блюда и другая домашняя утварь, украшенные орнаментами с изображениями кошачьих туловищ и птичьих голов. Обнаружено также множество костных остатков лошадей, коров, баранов, собак. Скорее всего, захоронения принадлежат древнекитайским этническим группам ронь и ди, которые позже, в период правления династии Хань (220—206 гг. до н.э.), были ассимилированы кочевым народом хунну.

Sciences et Avenir. 2003. №682. P.26 (Франция).

Б.Стоун и Дж.Хейфец (B.Stone, J.Heifetz; Национальная служба морского рыболовства США)

в 2002 г. открыли в северо-западной части пролива Амчитка, у юго-восточной оконечности о.Семисопочный (Алеутские о-ва), действующий подводный вулкан, названный Вулкано. Выполненная подводным аппаратом «Delta» видеосъемка показала, что склоны и подножие горы покрыты колониями глубоководных кораллов. Гидрографические работы с использованием многолучевых эхолотов позволили составить карты рельефа прилегающего к вулкану океанского дна. Они значительно детальнее прежних, изданных Национальным управлением США по океану и атмосфере.

Hydro International. 2003. V.7. №8. P.21 (Нидерланды).

Происхождение специфических иммуноглобулинов

В.Г.Галактионов

Хорошо известно, что в ответ на проникновение в организм патогенов (бактерий, вирусов, простейших и других возбудителей инфекций) среди прочего образуются антитела — наиболее эффективные защитники человека и животных от нежелательных визитеров. С легкой руки австралийского иммунолога, лауреата Нобелевской премии (1960) М.Ф.Бернета их стали называть иммуноглобулинами, подчеркивая тем самым прямое отношение к иммунной системе организма. Основное свойство таких белков — специфичность по отношению к проникшему в организм инфекционному агенту, т.е. иммуноглобулины, образуясь к возбудителю А, нейтрализуют только его, но инертны к любым другим инфекционным агентам В, С, D и т.д. Именно это свойство иммуноглобулинов было и в определенной степени остается до сих пор самым интригующим для иммунологов. С чем связана столь выраженная специфичность? Как в организме возникают такие иммуноглобулины? Как природа создала механизм специфичности? Вот те вопросы, на которые исследователи искали и продолжают искать ответы.

© Галактионов В.Г., 2004



Вадим Гелеевич Галактионов, доктор биологических наук, профессор кафедры иммунологии Российской медицинской академии постдипломного образования, ведущий научный сотрудник Института биологии развития им.Н.К.Кольцова РАН. Соросовский профессор. Область научных интересов — генетика, эволюция, регуляция иммунитета. Автор около 200 работ и 6 монографий по вопросам общей и эволюционной иммунологии.

Строение иммуноглобулинов

До середины 50-х годов прошлого столетия о структурной организации иммуноглобулинов ничего не знали. Первый шаг в этом направлении сделал английский иммунохимик Р.Портер в 1959 г. Он показал, что при обработке очищенных иммуноглобулинов протеолитическими ферментами образуются три фрагмента, два из которых взаимодействуют с антигеном (патогеном) и потому называются антигенсвязывающими (Fab), и один, неспособный к такому взаимодействию (Fc).

Но это ничего не говорило о причинах их специфичности по отношению к разным антигенам. Для получения информации о молекулярных основах

вариабельности нужно было значительное количество полностью идентичных белков. Сывороточные иммуноглобулины, в массе образующиеся после иммунизации, не давали такой возможности, поскольку они — производные нескольких клеточных клонов, каждый из которых продуцирует белки только одного класса и только одной, свойственной ему, специфичности. Иначе говоря, иммуноглобулины, выделяемые от интактных или иммунизированных животных, есть смесь молекул с разной специфичностью и разной принадлежностью к тому или иному классу.

Необходима была экспериментальная модель, позволяющая работать с одним клоном, образующим иммуноглобулины только одной специфичности

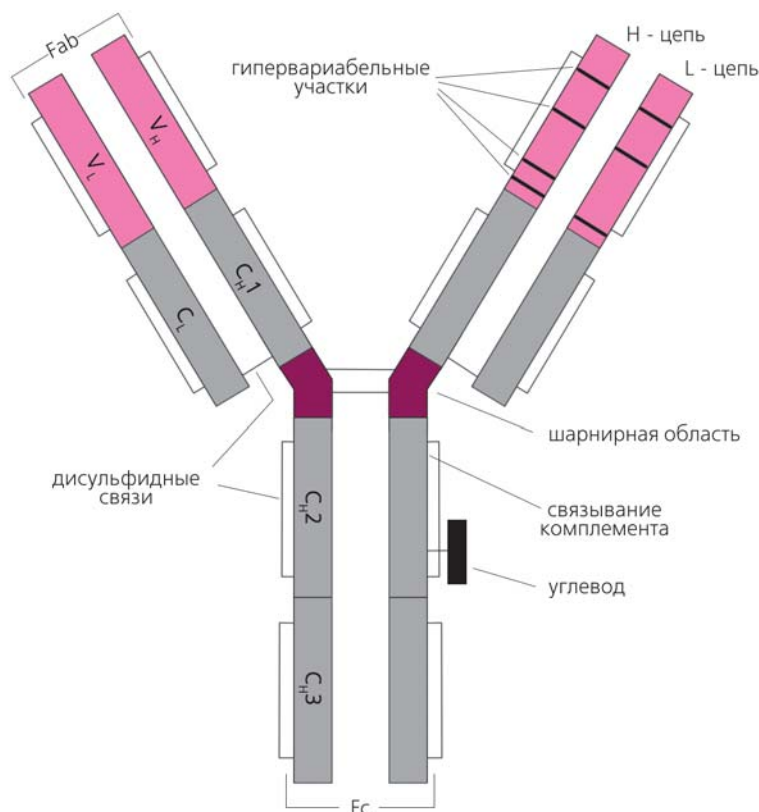


Рис. 1. Строение иммуноглобулина G. Две тяжелые (H) цепи с мол. весом 50 кД и две легкие (L) с мол. весом 25 кД объединены в единую молекулу с помощью ковалентных дисульфидных связей. Каждая цепь содержит вариабельную область (V_L и V_H для L- и H-цепей соответственно) и константную (C), подразделяющуюся у H-цепей на гомологичные участки (домены): C_{H1} , C_{H2} , C_{H3} . L-цепь имеет один константный участок — C_L . От взаимодействия V_H - и V_L -областей зависит специфичность иммуноглобулинов как антител. В аминокислотной последовательности V-доменов имеются гипервариабельные участки, характеризующиеся частой заменой аминокислот от белка к белку, и более консервативные. Между C_{H1} и C_{H2} доменами H-цепи находится шарнирная область, обеспечивающая подвижность антигенсвязывающего Fab-фрагмента. C_{H2} -домен служит местом присоединения углеводов и связывания комплемента. C_{H3} -домен взаимодействует с Fc-рецептором (не способным связывать антиген) на поверхности клеток, принимающих участие в иммунологических реакциях.

и только одного класса. Природа предоставила такую возможность — злокачественно трансформированные плазматические клетки больных миеломой. В настоящее время существует большой набор клонированных плазмочитом человека и животных, продуцирующих соответствующие миеломные белки.

Изучение аминокислотной последовательности иммуноглобулинов выявило принципиаль-

ные особенности в их строении. Каждая полипептидная цепь включает несколько доменов, гомологичных участков: тяжелая цепь — четыре или пять в зависимости от принадлежности к определенному классу и легкая цепь — два домена (рис.1). Первые домены изменчивы от белка к белку, все остальные — константны и у иммуноглобулинов одного класса представлены теми же самыми аминокислотами.

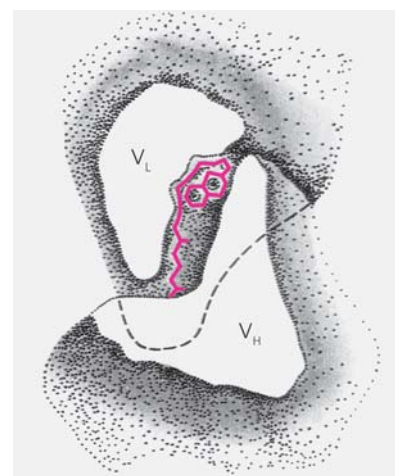


Рис. 2. Схема взаимодействия антигенсвязывающей области (активного центра) иммуноглобулина с антигеном — витамином K_1OH . Реконструкция на основании данных рентгеноструктурного анализа. V-домены легкой и тяжелой цепей (V_L и V_H) образуют полость (глубина 0.5—0.6 нм, длина 1.6 нм и ширина 0.7 нм), с которой связывается витамин (показан цветом). Как правило, параметры полости других иммуноглобулинов больше отмеченных здесь величин.

Ясно, что специфичность иммуноглобулинов как антител связана с вариабельными доменами. Собственно активный центр — участок, реагирующий с антигеном, образуется при взаимодействии вариабельных доменов тяжелой и легкой цепей (рис.2), обеспечивающих специфичность иммуноглобулинов.

Гены иммуноглобулинов

Наличие вариабельной и константной областей в структуре иммуноглобулинов молекулы позволило американским исследователям Дрейеру и Беннету еще в 1965 г. предположить, что в построении единой тяжелой или легкой цепей молекулы участвуют два гена (V и C). Это «еретическое» для середины 60-х го-

дов суждение, когда еще господствовало мнение, выражающееся формулой «один ген — одна полипептидная цепь», нашло свое подтверждение в несколько измененном виде в настоящее время.

В незрелых В-клетках, продуцентах иммуноглобулинов, или в любых других соматических клетках V- и С-гены расположены на одной и той же хромосоме, но на значительном расстоянии друг от друга. Подобная локализация определяется как состояние зародышевой линии. Однако по мере созревания В-клеток (от предшественника к зрелым формам) пространственно удаленные генные сегменты оказываются в непосредственной близости друг от друга, образуя единый информационный участок. Такая перестройка генетического материала, названная соматической рекомбинацией, происходит только в соматических клетках (в случае с иммуноглобули-

новыми генами только в В-клетках) и потому не наследуется.

Синтез тяжелых цепей иммуноглобулина контролируется тремя типами генных сегментов для V-доменов: V, D и J и десятью (по числу классов и подклассов иммуноглобулинов) сегментами для С-области соответствующих иммуноглобулинов (рис.3). Всего известно около 500 V-генных сегментов, 15 D-сегментов и четыре J-сегмента. Контроль синтеза легких цепей зависит от работы 250 V-генов, четырех J-генных сегментов и С-гена для константной части полипептида.

Изучение хромосомной организации иммуноглобулиновых генов и этапов их реорганизации в процессе развития В-клеток позволило достаточно точно установить первопричину вариабельности иммуноглобулинов. Ее основу составляет случайное объединение друг с другом отдельных генных сегментов в результате рекомбинации: V, D, J — для тяжелых це-

пей и V, J — для легких цепей иммуноглобулинов. При образовании единого информационного участка изменчивость для V-домена тяжелых цепей составит 30 тыс. ($500V \times 15D \times 4J$). Учитывая возможные нарушения при рекомбинации, связанные с включением пограничных нуклеотидов справа и слева от D- и J-сегментов, это число следует умножить на четыре. Тогда количество вариантов V-доменов для тяжелых цепей иммуноглобулинов будет 120 тыс., а для легких цепей уже 2 тыс. ($250V \times 4J \times 2$). Так как конкретная молекула иммуноглобулина строится при случайном сочетании тяжелых и легких цепей, общее число вариантов антигенсвязывающих центров, следовательно, и специфических иммуноглобулинов, составит $2,4 \cdot 10^8$ (рис.4). Однако, по мнению некоторых исследователей, в связи с дополнительными, не отмеченными здесь, рекомбинационными событиями она доходит до $10^{12} - 10^{14}$.

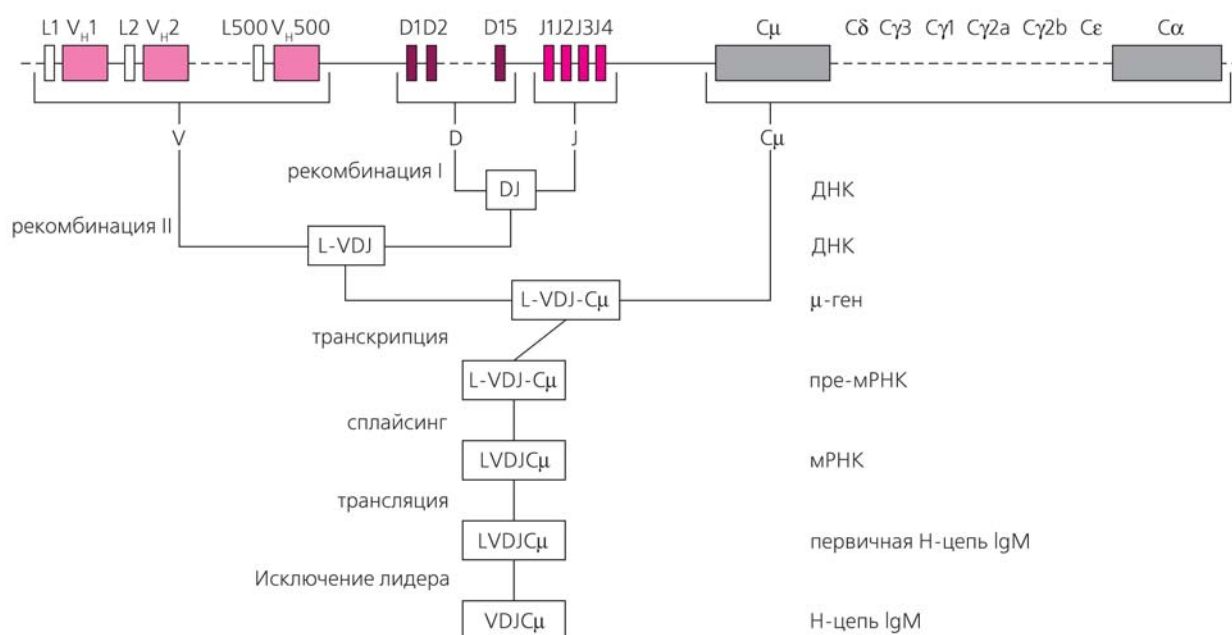


Рис.3. Рекомбинация генов, кодирующих тяжелые цепи иммуноглобулинов (V, D, J и C). Первое событие — объединение одного из 15 D-мини-генов с одним из 4 J-мини-генов; второе — объединение одного из 500 V_H -генов с DJ; третье — формирование VDJ- C_μ -локуса. Образующаяся при транскрипции с этого локуса пре-мРНК вступает в процесс созревания — сплайсинга. Особенность реорганизации генома В-клеток состоит в переключении контроля синтеза иммуноглобулинов одного класса на другой при сохранении контроля специфичности за счет реорганизованного VDJ-локуса.

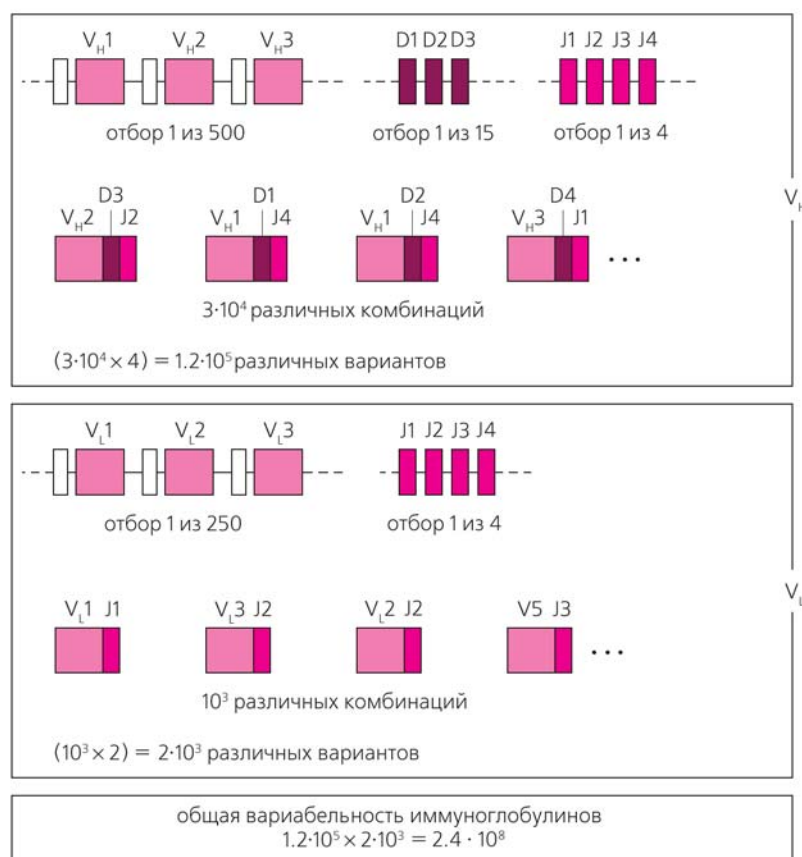


Рис.4. Схема случайных, разнообразных сочетаний генных сегментов, контролирующих V_H -домены тяжелых цепей иммуноглобулинов. В результате неконтролируемой рекомбинации этих сегментов возможно образование до 30 тыс. вариантов специфических антител. Величина выведена без учета дополнительной изменчивости в результате нарушений при рекомбинации, связанных с включением пограничных нуклеотидов справа и слева от D- и J-мини-генов. С учетом этих нарушений число вариантов тяжелых цепей увеличивается до 120 тыс. Аналогичные расчеты касаются и генов для V_L . Общая вариабельность как результат взаимодействия V_H с V_L — $1.2 \cdot 10^5 \times 2 \cdot 10^3 = 2.4 \cdot 10^8$.

Поскольку В-клетки одного клона продуцируют иммуноглобулины только одной конкретной специфичности, то по отношению к В-клеточной популяции в целом полученные цифры указывают на число таких клонов. Они образуют множество специфических иммуноглобулинов, способных взаимодействовать с соответствующим количеством антигенов. Ясно, что подобный порядок величин обеспечивает организму в условиях физиологической нормы защиту от последствий самых

разнообразных антигенных (патогенных) вторжений.

Эволюция иммуноглобулинов

Среди проблем современной иммунологии вопрос об историческом развитии иммуноглобулинов — один из основных. Он напрямую связан с пониманием биологических явлений, которые привели к возникновению и совершенствованию системы иммунологического распознава-

ния — начального этапа нейтрализации и уничтожения патогенных микроорганизмов. Сегодня очевидно, что спектр вариабельности различных классов иммуноглобулинов, характерный для млекопитающих, имеет длительную историю, корнями уходящую к одноклеточным животным. Проникновение в самую отдаленную глубину времен стало возможным благодаря технологическим возможностям молекулярной биологии и генетики.

Исследования 80-х годов показали, что иммуноглобулины не одиноки в организме животных. Они лишь члены достаточно большой группы, включающей более 50 самостоятельных белков, подобных иммуноглобулинам, но обладающих не только иммунологической функцией. Группа получила название суперсемейства иммуноглобулинов, для которых характерны два свойства: статистически значимая гомология с иммуноглобулинами в последовательности аминокислот и особая, свойственная только им, структурная организация доменов (рис.5), обозначаемая как Ig-fold (иммуноглобулиновая складчатость).

Всего выделяют четыре основных типа доменов: V1, V2, C1 и C2. Хотя по своей структуре они схожи, но функционально отличаются друг от друга. Для нас наиболее интересны V-домены, поскольку именно они и сформировали способность к специфическому распознаванию чужеродного биологического материала, в первую очередь патогенных микроорганизмов.

V1-домены могут взаимодействовать с чужеродными молекулярными структурами (антигенами). Гены, ответственные за их образование, включают как собственно V-ген, так и два мини-гена — D и J. От их реорганизации в процессе созревания В-клеток и зависит специфичность V1-доменов, взаимодействие с различным структурно меняющимся биологическим материалом, антигенами. Контакт V1-доменов с чужеродными со-

Лектормат

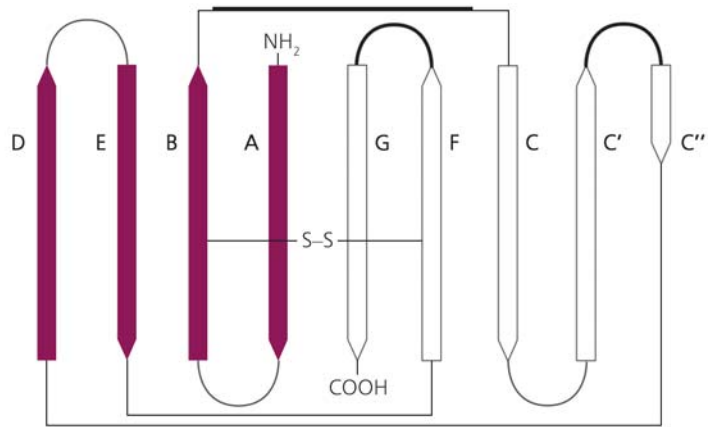
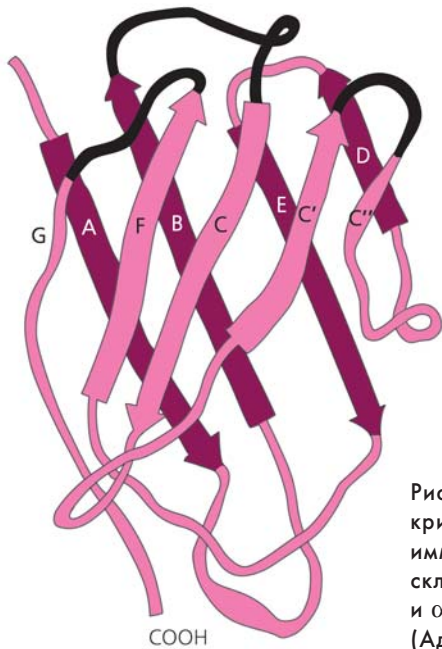


Рис.5. Структурная организация V-домена. Слева — диаграмма кристаллографического анализа V-домена тяжелой цепи иммуноглобулина человека, демонстрирующая характер двухслойной складчатости (Ig-fold). Справа — связи между β-структурными слоями и α-спиралями; черный цвет — гипервариабельные участки. (Адаптировано из: Barclay A.N., 1999.)

единениями получил название гетерофильного взаимодействия, т.е. «своего» с «чужим».

V2-домены самостоятельно или в составе каких-либо белков могут взаимодействовать между собой по принципу «свое» со «своим» — V2↔V2 (гомофильное взаимодействие). Ген, контролирующий этот домен, представляет собой единый информационный участок.

Основной вопрос эволюционной иммунологии как раз и состоит в том, чтобы понять, когда, как и зачем гомофильное взаимодействие сменилось на

гетерофильное, т.е. неорганизуемый V-ген стал реорганизуемым. Другими словами, что обеспечило эволюцию предковых V-доменов до современных форм, способных реагировать с множеством антигенов (патогенов).

Наиболее ранние обладатели иммуноглобулиновой складчатости (структуры Ig-fold) — прокариоты (бактерии эшерихии, клебсиеллы, др.). У этих бактерий данный домен выполняет функцию шаперона — низкомолекулярного белка, участвующего в построении адгезивных молекул (рис.6). Белок нервной ткани

(P₀), маркер тимоцитов и Т-клеток (Thy-1), входящие в V2-группу, также относятся к ранним эволюционным образованиям. Полипептиды, родственные белку Thy-1 млекопитающих, обнаружены у птиц, рептилий, рыб, дождевых червей, туникат, головоногих и брюхоногих моллюсков, одноклеточных эу- и прокариот. Функция Thy-1 точно не определена. Возможно, его появление в филогенезе связано с возникновением многоклеточных около 2 млрд лет назад. Тогда благодаря контактному взаимодействию «своего» со «своим» он выступал как один из поверхностных молекулярных факторов межклеточной адгезии.

Гену этого белка сопутствовал явный эволюционный успех. Именно ему суждено было стать прародителем V-генов всего суперсемейства иммуноглобулинов. Их распространенность обеспечивалась обычными генетическими механизмами: тандемными дупликациями (многократным копированием исходного гена по длине хромосомы, приводящим к полигении наследования), транслокациями (перемещением гена в геноме клетки), делециями (потерей определенного количества нук-

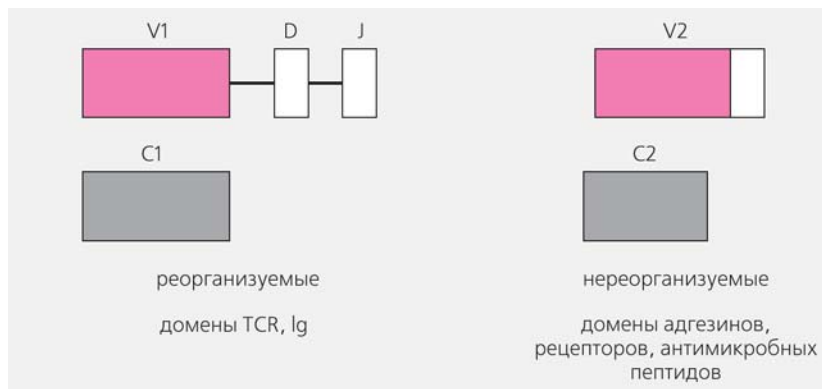


Рис.6. Гены, контролирующие различные типы доменов суперсемейства Ig, — V1, V2, C1, C2. Генные сегменты, вступающие в рекомбинацию для контроля синтеза соответствующего домена, — D, J.

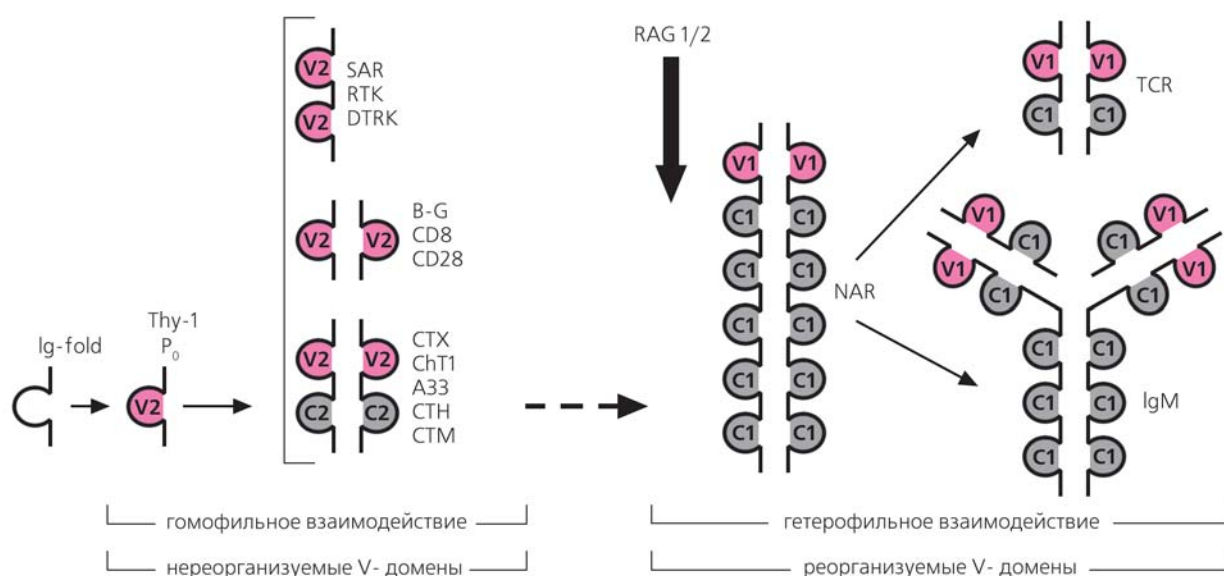


Рис.7. Филогенез иммуноглобулинподобных молекул. Слева — однодоменный шаперон прокариот с структурой Ig-fold и два однодоменных белка P₀ и Thy-1. Эти белки были предковыми для целой серии двухдоменных белков (SAP — адгезивный белок губок, PTR — рецепторная тирозинкиназа губок, DTRK — рецепторная тирозинкиназа дрозофилы, B-G — поверхностный антиген кур, CD8 — корецептор цитотоксических Т-клеток млекопитающих, CD28 — рецептор, принимающий участие в инициации иммунного ответа, CTX, ChT1, CTH, CTM — соответственно рецепторы кортикальных тимоцитов лягушек, кур, человека, мыши). RAG-1 и -2 — гены, обеспечивающие рекомбинацию, определили эволюционное развитие членов суперсемейства по антигенспецифическому пути развития. Предшественником Т-клеточного антигенраспознающего рецептора (ТКР) и иммуноглобулина М (IgM) был новый антигенный рецептор акул (NAR).

леотидов) и точечными мутациями (заменой одних нуклеотидов на другие).

Пример наиболее раннего тандемного события в исторической ретроспективе — гены губок, наиболее примитивных многоклеточных животных, которые контролируют два белка: адгезивный SAM и рецепторную тирозинкиназу RTK. У этих белков два поверхностных V-домена гомологичны V-доменам иммуноглобулинов человека. Сегодня известно около 40 полигенных копий данных белков. Экспрессия RTK и SAM усиливается при ауто- и аллотрансплантации. Эти факты крайне важны для возникновения первых признаков специфического иммунитета в мире животных. К категории двухдоменных белков, включающих V2-домены, относятся также рецепторы кортикальных тимоцитов (субпопуляций клеток тимуса) лягушек (CTX), кур

(ChT1), человека (CTH) и др. (рис.7). Вся группа белков, подобных иммуноглобулинам, способна лишь к гомофильному взаимодействию. Должно было произойти важное эволюционное событие, чтобы возникло основное свойство классических иммуноглобулинов — взаимодействие с чужеродным антигеном.

Предполагается, что главный виновник формирования специфических иммуноглобулинов — ретровирус, который в отдаленные геологические времена внедрился в единый V-геном предков позвоночных животных (около 450 млн лет назад). Подобное событие привело к расщеплению V-гена на собственно V-ген и D- и J-сегменты. Геномные участки, оказавшись самостоятельными, подвергались обычным генетическим процессам — в первую очередь тандемным дупликациям и случайным мутациям. В результате возникло

множество V-генов (у млекопитающих их более 500).

Вторая важная функция генов состоит в обеспечении синтеза рекомбиназ (RAG-1, RAG-2) — ферментов, участвующих в реорганизации V-, D-, J-генных сегментов. Случайность их объединения определяет множественность синтезируемых V-доменов. Для тяжелых иммуноглобулинов только за счет рекомбинации образуется около $1.2 \cdot 10^5$ вариантов. Ясно, что появление в эволюции механизма рекомбинации V-генов было прогрессивным событием.

При анализе представленного здесь филогенетического ряда необходимо ответить на некоторые, не вдруг решаемые вопросы. Например, с чем связан переход от гомофильных форм взаимодействия к гетерофильным, что его вызвало и привело в результате к созданию столь уникальной системы распозна-

вания в виде клоно- и антиген-специфических Ig и ТКР*.

Думается, что первым и наиболее важным событием было эволюционное возникновение Ig-fold доменов, подобных шаперонам современных прокариот. Для таких доменов, сыгравших столь значимую роль в эволюции антигенраспознающих рецепторов, характерно наличие аминокислотных петель, соединяющих β -структурные последовательности. Именно в них происходили аминокислотные замены, поставившие для отбора сырой материал в виде структурно меняющихся V-доменов.

Первоначальная функция Ig-fold доменов — участие в межклеточных гомофильных взаимодействиях. Эту роль в эволюции могли выполнять предшественники однодоменных, а затем и двухдоменных V-подобных белков Thy-1, P₀, SAP, RTK, DTRC. Их появление в эволюции не случайно. Они стояли у истоков возникновения многоклеточных, обеспечивая межклеточную адгезию посредством гомофильного взаимодействия.

Первичные многоклеточные животные (впрочем, как и современные), находясь в тех или иных биоценологических условиях, неизбежно подвергались агрессии патогенов внешней среды от вирусов до паразитических многоклеточных. В этом нет ничего неожиданного, и современная жизнь различных видов животных дает тому бесчисленное множество примеров. Важно другое. Первичные V-гены с повышенной изменчивостью обеспечивали синтез варьирующих по специфичности V-доменов. Некоторые из них случай-

* ТКР — антигенраспознающий рецептор Т-клеток; гетеродимер, построенный из α - и β -цепей, каждая из которых включает один реорганизуемый V1-домен и один C-домен.

ным образом взаимодействовали с антигенами патогенов. Если патогенетическое действие внешнего агента снижалось, а устойчивость особей вида повышалась, то ген, контролирующий измененный домен, благодаря сильному давлению отбора закреплялся в популяции вида. Такие отношения между первичными многоклеточными и патогенами привели к переключению гомофильного взаимодействия на гетерофильное, действующее по принципу рецептор—лиганд. Со временем количество мутационно измененных V-генов увеличилось. Выраженная полигения V-генов у современных челюстноротых позвоночных животных тому прямое подтверждение.

Случайные мутации и отбор как определяющие факторы в эволюции антигенраспознающих рецепторов были сопряжены с рядом дополнительных явлений. К ним относится: самостоятельное развитие генов для C-доменов; их объединения с V-генами в единый локус, число которых росло из-за тандемных дупликаций; появление дополнительных D- и J-генных сегментов, расширяющих пределы изменчивости V-доменов благодаря рекомбинации с основными V-генами. Все эти процессы были крайне важны для формирования молекулярной системы антигенного распознавания, окончательный вариант которой представлен у млекопитающих. Они составили основу для действия RAG-1 и RAG-2 генов, которые и определили переход от гомофильного взаимодействия к антигенспецифическому гетерофильному. Интродукция ретровирусных генов в геном позвоночных была столь существенна для создания специфического иммунитета, что получила название «большого взрыва».

* * *

Зачем конкретному индивиду такой большой запас реорганизуемых V-генов, если в жизни он встречается с ограниченным числом антигенов и большинство V-генов оказывается бесполезным? Ответ на этот вопрос лежит в двух плоскостях. Во-первых, мы не знаем, с каким истинным многообразием антигенов входит в контакт конкретный организм в течение жизни. Помимо традиционных бактериальных, вирусных, грибковых антигенов, возможны антигенные нагрузки, связанные с мутационно измененными собственными клетками. Во-вторых, для жизнедеятельности вида, его стабильности не столь важно, проявляется или нет тот или иной признак у конкретной особи, но существенно присутствие генов, контролирующих данный признак, если он адаптивен. Гены, обладающие неограниченным свободным скрещиванием, — достояние всей популяции и вида в целом, т.е. входят в состав его генофонда.

Общие положения, сформулированные при анализе видообразования, самым тесным образом связаны с пониманием значения избыточного пула иммунологической специфичности для вида. Антигенраспознающие рецепторы или иммуноглобулины, неостребованные у какой-либо особи вида в течение ее индивидуальной жизни, могут оказаться необходимыми другой особи данной популяции или особям иных поколений той же популяции. В целом же уровень специфичностей иммуноглобулинов, имеющийся у высших позвоночных животных, создает необходимый запас прочности для стабильной жизнедеятельности вида. ■

Атмосферный метан и глобальный климат

И.Л.Кароль, А.А.Киселев

Упоминание о метане у большинства людей обычно ассоциируется со взрывами и человеческими жертвами на угольных шахтах. Впрочем, в атмосферу этот газ попадает из множества источников, география которых достаточно обширна. Данное обстоятельство серьезно осложняет проводимые в последние десятилетия исследования особенностей поведения и эволюции атмосферного метана, его влияния на климат. Между тем, CH_4 — один из важнейших парниковых газов и вносит значительную лепту в широко обсуждаемое глобальное потепление. Полагают, что его эмиссия должна быть сокращена в соответствии с до сих пор не вступившим в действие Киотским протоколом (1997), поэтому Европейский Союз ныне финансирует несколько научных проектов, направленных на всестороннее изучение этого газа.

Известно, что ряд атмосферных газов — водяной пар H_2O , углекислый газ CO_2 , закись азота N_2O , озон O_3 , метан CH_4 , гексафторид серы SF_6 , а также многочисленная группа хлорфторуглеводородов и гидрофторуглеводородов — обладает способностью эффективно поглощать инфракрасное излучение, испускаемое земной поверхностью, самой атмосферой и облаками. Благодаря этому действию парниковых газов среднегодовая глобальная температура у по-



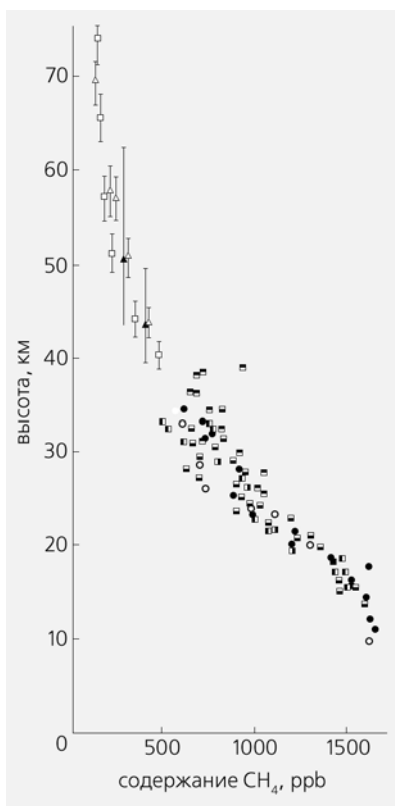
Игорь Леонидович Кароль (справа), доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Главной геофизической обсерватории им.А.И.Воейкова. Специалист в области моделирования климата, фотохимических и радиационных процессов в атмосфере.

Андрей Александрович Киселев, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела динамической метеорологии той же обсерватории. Занимается фотохимическими процессами в атмосфере.

верхности Земли составляет около 14°C , в то время как при их отсутствии она была бы на 33° ниже, т.е. -19°C . Данные регулярных измерений свидетельствуют о том, что с начала индустриальной эпохи (около 1750 г.) содержание в атмосфере углекислого газа увеличилось примерно на 30%, закиси азота на 16%, метана в 2.5 раза. Ограничения Монреальского протокола приостановили рост концентрации в атмосфере хлорфторуглеводородов, имеющих антропогенное происхождение, но содержание их заменителей — гидрофторуглево-

дородов — продолжает увеличиваться. Повышение концентрации парниковых газов привело к нарушению складывавшегося тысячелетиями теплового баланса, и, как следствие, к повышению температуры тропосферы — у поверхности Земли в течение XX в. оно составило примерно 0.6° .

Естественно, лепта, вносимая каждым из перечисленных газов, не одинакова. В настоящее время вклад CO_2 в усиленный парниковый эффект составляет более 60%, на метан приходится около 20%, а за оставшиеся 20% ответ-



Содержание метана, ppb (parts per billion), в различные сезоны и на различных высотах в течение 1973—1985 гг. В стратосфере разрушение метана гидроксилом приводит к образованию другого важного парникового газа — водяного пара.

ственные другие парниковые газы. Но при этом молекула CH_4 в десятки раз эффективнее поглощает инфракрасное излучение, чем молекула CO_2 . Главенствующая же роль последнего достигается только тем, что количество молекул CO_2 в атмосфере примерно в 200 раз больше, чем метана. Но поскольку концентрация CH_4 в индустриальную эпоху росла гораздо быстрее концентрации CO_2 , очевидно, что при сохранении существующей тенденции уже в недалеком будущем вклад метана в усиление парникового эффекта будет еще более весомым. И чтобы по крайней мере сократить темпы глобального потепления, резонно попытаться замедлить рост концентрации этого газа (как,

впрочем, и других парниковых газов) в атмосфере.

Источники естественные и антропогенные

Содержание всякого газа в атмосфере определяется соотношением интенсивности его источников и стоков, а срок пребывания в атмосфере (время жизни) — совокупной скоростью его химического разрушения и механического удаления из атмосферы. Молекулы метана не обладают высокой реактивной способностью и взаимодействуют лишь с очень активными молекулами гидроксила OH и атомами хлора Cl , а также возбужденного кислорода $\text{O}(^1\text{D})$. В тропосфере разрушение CH_4 происходит главным образом в реакции с OH , однако в верхней стратосфере (выше 35 км) с ней успешно конкурирует реакция метана с атомарным хлором. (Заметим попутно, что указанные реакции ведут также к гибели молекул OH и атомов Cl — разрушителей атмосферного озона. Таким образом, при повышении концентрации CH_4 содержание O_3 в атмосфере увеличится [1], а не уменьшится, как считают некоторые исследователи [2].) Доля реакции CH_4 с $\text{O}(^1\text{D})$ в фотохимическом стоке метана относительно невелика. Разрушение молекул CH_4 солнечными лучами (фотолиз), происходящее в верхней стратосфере, столь незначительно, что в расчетах им часто пренебрегают. Кроме того, метан поглощается почвами в сухих субтропических лесах со скоростью большей, чем во влажных умеренных и тропических. В результате совместного действия всех перечисленных физико-химических процессов молекула CH_4 , по разным оценкам, живет в атмосфере 8—12 лет.

Химическим путем метан не образуется, поскольку для генерирования его довольно сложных молекул необходимо большое количество энергии. Поэто-

му атмосферные источники CH_4 отсутствуют, и поступление метана в атмосферу полностью контролируется его потоками с земной поверхности. Метан возникает и накапливается в недрах Земли, в среде, где гниение отмершей растительности происходит при дефиците свободного кислорода. Таким образом, среди источников метана преобладают микробиологические процессы с участием анаэробных бактерий, которые могут быть выражены результирующей формулой $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Молекулярный водород для протекания этой реакции выделяется бактериями, не генерирующими метан, но развивающимися в той же самой среде.

Метан продуцируют также высшие животные (в первую очередь, крупный рогатый скот), в кишечниках которых создаются оптимальные условия для существования микробов, выделяющих метан. По некоторым оценкам [3], «продуктивность» одной коровы составляет 250 л CH_4 в сутки.

Все источники метана обычно делят на две большие группы: естественные и антропогенные. К первым относят потоки CH_4 с поверхности заболоченных территорий, пресноводных водоемов, океанической поверхности, а также метан, образующийся в колониях термитов и выделяемый при сжигании огромных объемов биомассы в результате пожаров. Здесь необходимо маленькое отступление.

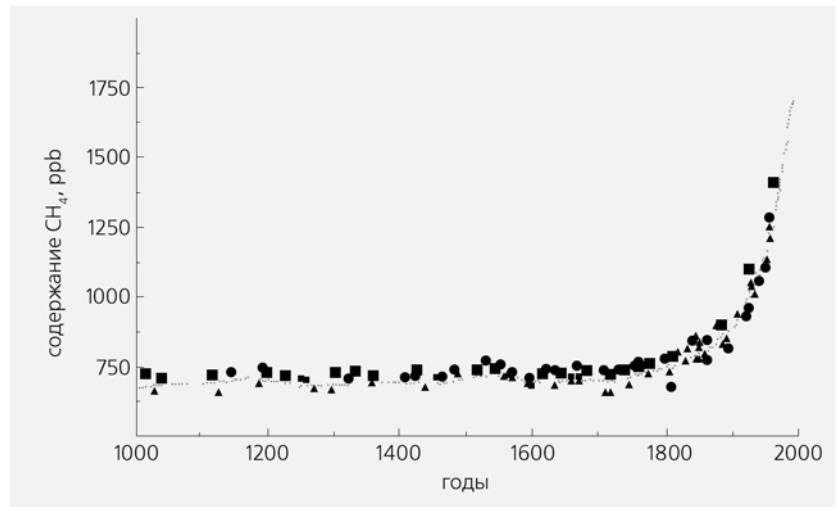
Определение суммарного количества метана, поступающего в атмосферу от каждого из источников, — несомненно, важная, но вряд ли решаемая инструментальными средствами задача. Поток CH_4 , например, с поверхности заболоченных территорий существенно зависит от температуры поверхности, типа болота (торфяного, сфагнового и др.), характера растительности и ее плотности, воды на поверхности и других факторов.

Поскольку заболоченные территории встречаются до-

вольно часто (исключая полярные области), и каждой местности присущи свой климатический режим и своя растительность, величины потока CH_4 с разных увлажненных территорий будут заметно отличаться, а организация регулярных измерений потока CH_4 в столь большом количестве мест практически неосуществима.

Поэтому мощность каждого источника метана определяется с помощью решения обратной задачи. Другими словами, подбирается значение, которое, будучи подставленным в модель, обеспечивало бы наилучшее согласие расчетных концентраций CH_4 с измеренными. Естественно, получаемые оценки зависят от класса и особенностей используемой модели и заметно различаются у разных авторов. Однако вернемся к обсуждению источников метана.

Среди естественных источников метана наиболее интенсивен поток CH_4 с поверхности заболоченных территорий. Его величина оценивается экспертами в 110 Мт/год с разбросом значений от 55 до 150 Мт/год (здесь и далее мы приводим оценки 90-х годов [4]), причем более половины (около 60 Мт/год) приходится на тропики, а на северные широты почти все оставшееся — 40 Мт/год. На порядок меньше



Среднегодовое среднее по земному шару содержание метана в приземном воздухе.

поток с поверхности океана — 10 Мт/год и с пресноводных поверхностей — 5 Мт/год. Ежегодная производительность термитников оценивается в 20 Мт метана. Еще 40 Мт/год поступает в атмосферу в результате сгорания биомассы при пожарах, в большинстве своем происходящих в тропической зоне. Таким образом, ежегодно благодаря естественным источникам в атмосферу попадает около 200 Мт CH_4 (с разбросом оценок от 101 до 355 Мт/год).

В число антропогенных источников входят потоки, попа-

дающие в атмосферу при добыче ископаемого топлива, с мусорных свалок и при последующем сжигании бытовых отходов, очистке сточных вод, расширении сельскохозяйственных угодий (в том числе рисовых плантаций), при разведении крупного рогатого скота.

Совместные усилия угле-, газо- и нефтедобывающих предприятий во всем мире увеличивают эмиссию метана в атмосферу на 100 Мт/год (в природном газе на его долю приходится 77–99%, в попутных нефтяных — 31–90%, в рудничном —



Мировая эмиссия метана (Мт/год) от естественных (I) и антропогенных (II) источников.

34–40%). Из этих 100 Мт/год промышленной эмиссии примерно 47 дает добыча и сжигание угля, а 37 и 17 Мт/год соответственно — утечка из скважин и при транспортировке газа и нефти.

Подсчитано, что крупный рогатый скот производит 80 Мт CH_4 в год. (В 2000 г. насчитывалось чуть больше 1 млрд голов, из них 314 млн — в Индии, 150 — в Бразилии, 130 — в Китае и около 100 млн — в США.)

Ежегодный поток CH_4 в атмосферу с рисовых плантаций оценивается в 60 Мт, еще около 30 Мт CH_4 в год попадает в атмосферу при других способах земледелия.

При накоплении и переработке мусора в атмосферу попадает 57 Мт в год. Географическое распределение этих потоков напрямую зависит от экономического развития страны, численности и плотности населения, отчасти от национальных традиций. Примерно вдвое меньше, 25 Мт CH_4 в год, дает очистка сточных вод.

В итоге из антропогенных источников в атмосферу попадает около 360 Мт/год (от 259 до 537), а всего 560 Мт/год CH_4 (от 360 до 892). Другими словами, примерно 2/3 глобальной эмиссии метана обусловлено деятельностью человека, хотя деление источников на антропогенные и естественные несколько условно — осушают естественные болота, метан присутствует в продуктах жизнедеятельности не только домашних, но и диких травоядных животных.

Нетрудно заметить, что основные источники метана размещаются в Северном полушарии, где находится подавляющее большинство экономически развитых держав. К тому же площадь суши, на которой в основном располагаются источники CH_4 , здесь значительно больше, чем в Южном полушарии. А что же Россия? Сколь велик наш вклад в глобальную эмиссию метана?

Российский вклад

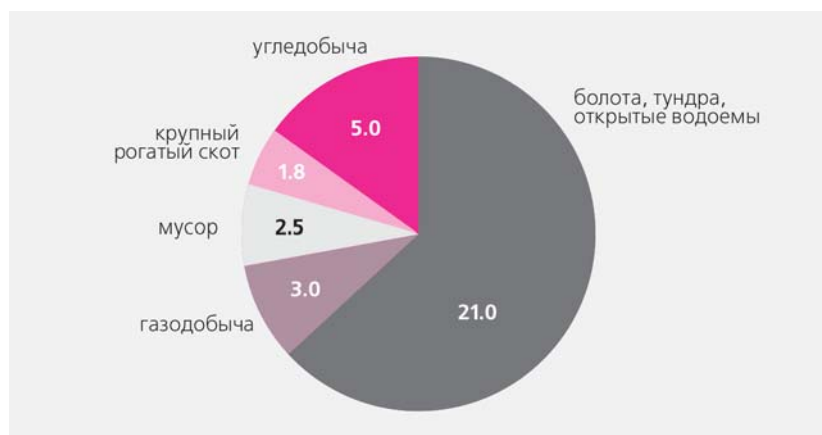
В силу своего географического положения наша страна не является родиной термитов, и рис далеко не главный среди производимых ею зерновых. Поэтому российский вклад в эмиссию CH_4 складывается в основном из потоков метана с поверхности переувлажненных территорий (включая болота, открытые водоемы, тундру и т.д.), его утечек, сопутствующих добыче ископаемого топлива, и метана, выделяемого в результате жизнедеятельности крупного рогатого скота и при утилизации мусора.

По оценкам, гниение и сжигание российского мусора увеличивает ежегодный поток метана примерно на 2.5 Мт. В 1990-х годах в России и странах СНГ резко сокращалось количество крупного рогатого скота, и к 2000 г. в России его насчитывалось лишь 27 млн голов (в 1991 г. в СССР — 57 млн). Как следствие, в данный период уменьшался и выброс CH_4 , обусловленный этим источником, в 2000 г. он оценивался в 1.8 Мт/год. Из-за экономического спада 1990-х закрылись шахты в России, на Украине, в Казахстане, значительно сократилась добыча угля. Существующая на этот счет статистика весьма противоречива, что, конечно, осложнило расчеты, поэтому экспертные оценки имеют большой разброс — от 2.5 до 5 Мт CH_4 в год.

Как известно, Россия обладает огромными запасами природного газа, добыча которого — приоритетная отрасль ее экономики. Вопрос о необходимости оценки объема утечки газа неоднократно поднимался российскими и международными природоохранными организациями (по расчетам 1990-х годов, из-за нее в атмосферу может попадать от 1.42 до 17 ± 13 Мт CH_4 в год).

Недавно сотрудники Главной геофизической обсерватории провели исследования величины эмиссии метана в атмосферу из района крупнейших газовых месторождений Западной Сибири (Уренгойского, Ямбургского, Медвежьего и др.), что позволило существенно уточнить эти оценки. Установлено, что эмиссия CH_4 от газовых месторождений не превышает 2–3 Мт/год, что соответствует 0.5–0.8% всего добываемого объема [5].

Переувлажненные территории, по данным 70-х годов, занимали 1.512 млн km^2 , или 6.75% площади СССР. При этом львиная их доля приходилась на Россию. Однако по продуктивности метана эти районы на севере 5–9 мес в году сильно уступают своим южным «собратьям», так как значительную часть года покрыты льдом, когда поток CH_4 в атмосферу сильно сокращается. С учетом этого обстоятельства, по нашей оценке, эмиссия CH_4 от российских переувлажненных территорий, располо-



Российские источники выбросов метана (Мт/год) в атмосферу.

женных в поясе 30—60°с.ш., составляет около 21 Мт/год. Общие же выбросы CH₄ с территории России можно оценить в 35—40 Мт/год.

Ввиду того, что молекула CH₄ живет в атмосфере 8—12 лет, а на путешествие воздушных масс из одного полушария в другое достаточно нескольких месяцев, содержание метана в воздухе почти одинаково в разных уголках земного шара. В частности, средняя концентрация CH₄ в Южном полушарии всего на 6% ниже, чем в Северном, где, как уже говорилось, расположены его основные источники. Относительная химическая пассивность метана приводит к тому, что его содержание не подвержено заметным сезонным изменениям, которые не превышают нескольких процентов, причем самые низкие концентрации приходится на конец лета, а наибольшие на зиму и весну. Исключение составляют северные высокие широты, там наблюдается резкое увеличение концентрации метана к осени, связанное с освобождением ото льда болотистых почв.

Анализ образцов из ледовых кернов, отобранных в Антарктиде и Гренландии, позволил проследить эволюцию концентрации CH₄ в атмосфере. Во время последнего ледникового максимума (18—20 тыс. лет назад) она составляла в нижней тропосфере 350 ppb, к 1850 г. возросла до 820 ppb, в 1950 г. — уже до 1180 ppb, в 1990 г. — 1694 ppb и в 2000 г. — 1752 ppb. Налицо беспрецедентно быстрый рост содержания атмосферного метана за последние 50 лет — на 48.4%.

Будущее — ближайшее и отдаленное

А как изменится содержание атмосферного метана в будущем, ближайшем и отдаленном? Вопрос достаточно трудный, ответ на него зависит от множест-

ва объективных и субъективных факторов, главный из которых — наши недостаточные знания, в частности, о механизме обмена метана между геосферами (недрами Земли, океаном, атмосферой). Например, до сих пор не объяснено наблюдавшееся в начале XX в. резкое, но непродолжительное замедление скорости роста его содержания. Другой важный фактор неопределенности будущего метана — стратегия национальных и мировой экономик, технических и технологических новаций.

Известно, что англичане разрабатывали и успешно внедряют методику консервирования закрытых шахт, надежно препятствующую проникновению через них метана в атмосферу. Голландцы начинают использовать технологии очистки коровников, предотвращающие утечку метана.

Рост населения ведет к увеличению потребности в продовольствии, а значит, грядет увеличение сельскохозяйственных площадей и поголовья скота. Но площади сельскохозяйственных угодий будут распределяться по-разному, в зависимости от пищевых пристрастий и сбалансированности рациона тех или иных народов: где-то будут увлажняться новые территории под овощеводство, где-то — осушаться под зерновые. Но наряду с этим из-за неумелой ирригации появятся новые болота.

Конечно, отказ от традиционных источников энергии — угля, газа, нефти — в пользу альтернативных, экологически более чистых, вряд ли реален в ближайшем будущем. Наиболее вероятным представляется умеренный рост содержания метана в ближайшие десятилетия, что подтверждает Межправительственная группа экспертов по изменению климата, разработавшая 35 сценариев возможной эволюции содержания важнейших компонент атмосферного воздуха. В них рассмотрены последствия различных путей развития мировой

экономики в XXI в., при которых наиболее часто рост концентрации метана к 2050 г. оценивается в 40—50%.

Остается открытым вопрос о глобальных запасах метана в газогидратах — кристаллических образованиях, скрытых под океанической толщей и ледяным покровом в зоне вечной мерзлоты. По немногочисленным измерениям, общее содержание CH₄ в поддонных отложениях в районе Мексиканского залива, в Северном Ледовитом и Тихом океанах оценивается в $1.3 \cdot 10^7$ Мт, масса метана в арктических газовых гидратах — 10^4 — 10^7 Мт, а залежи CH₄ под ледяным покровом — в $2.7 \cdot 10^6$ Мт (правда, с возможной десятикратной (!) ошибкой). Для сравнения заметим, что общее содержание метана в современной атмосфере оценивается примерно в 4000 Мт, т.е. составляет несколько сотых процента от глобальных его запасов. Иногда высказывается опасение (в основном в геологической периодике), что наблюдаемый и прогнозируемый рост температуры окружающей среды может стать причиной полного или частичного высвобождения метана из его резервуаров при изменении интенсивности обмена между донными и вышележащими слоями океана, а также таяния в зонах вечной мерзлоты. При повышении температуры на 1—1.5°С в таких районах, занимающих 2/3 территории России, приток метана может увеличиться на 100 млрд м³, или примерно на 70 Мт [6].

Резкий рост концентрации метана, случись такая масштабная экологическая катастрофа, повлечет серьезные изменения не только в температурном режиме атмосферы, но и в ее газовом составе. И как мы уже подчеркивали, за ростом содержания CH₄ последует повышение концентрации озона и падение концентрации гидроксила. Самый активный радикал в атмосфере, он контролирует присутствие в ней многих компонент и тем самым осуществляет само-

очищение атмосферы. Поэтому при значительном уменьшении содержания ОН способность атмосферы к самоочищению существенно сократится.

Наши исследования показали, как изменятся концентрации гидроксила, озона и других газов в тропосфере северных умеренных широт при увеличении современной концентрации CH_4 в 10 раз, т.е. в случае, когда утечка из геологических резервуаров составит величину порядка 1% от оцениваемых запасов. Рост концентрации озона при этом составит 80–90% в нижней тропосфере и около 50% в верхней, а концентрация ОН уменьшится на 30–50%. По нашим оценкам, такой десятикратный рост содержания CH_4 вызовет увеличение температуры в нижней тропосфере еще на 0.5°C . Мы далеки от нагнетания страстей вокруг подобной экологической катастрофы и рассматриваем наши модельные оценки скорее как иллюстрацию степени зависимости важнейших атмосферных компонент и температуры от эволюции главного героя этой статьи — метана.

Вместо заключения

Интерес к проблеме метана в ближайшие годы наверняка сохранится. Считается, что именно через этот газ можно наиболее эффективно регулировать избыточный парниковый эффект. Действительно, эмиссия CH_4 , на две трети антропогенная, несравненно более доступна для контроля, чем источники «гуляющего сам по себе» CO_2 . К тому

же полный цикл пребывания молекулы метана в атмосфере (8–12 лет) во много раз короче аналогичного для молекулы углекислого газа, а, значит, результатов регулирования не придется ждать десятилетиями. Наконец, вклад CH_4 в усиление парникового эффекта — второй по значимости, и если невозможно регулировать поведение лидера — CO_2 , можно остановить свой выбор на метане.

Обеспокоенность продолжающимся глобальным потеплением и его вероятными последствиями вкупе с отсутствием на сегодняшний день каких бы то ни было действующих международных ограничений — достаточный стимул для дальнейшей дискуссии вокруг парниковых газов среди ученых, журналистов, политиков. В этой связи Россия как обладательница колоссальных запасов природного газа, одна из ведущих стран по добыче и экспорту нефти, изрядная часть площади которой занята переувлажненными территориями, неизбежно будет оставаться в центре всеобщего внимания. Прискорбно, но к такой роли наша страна совершенно не готова. В случае с метаном объектом для проведения любых исследований, как теоретических, так и сугубо практических, могут служить лишь данные натурных измерений, причем обязательно представленные в достаточном объеме. К сожалению, на территории России есть лишь несколько постоянно действующих станций, ориентированных на мониторинг парниковых газов, но нет разветвленной сети. Как следст-

вие, немногочисленные проведенные измерения носят спорадический характер и представляют собой плод усилий (оплачиваемых, кстати, европейскими партнерами) небольших групп энтузиастов. Конечно, существуют объективные трудности для создания такой сети, например, труднодоступность тех же болот на российском Крайнем Севере, однако куда важнее отсутствие даже минимального внимания (читай — финансирования) к проблеме со стороны имущих и властей предрержащих. Можно и нужно скрупулезно оценить все *pro* и *contra* участия России в международных природоохранных проектах, в том числе подписания упомянувшегося Киотского протокола. Но чтобы быть в состоянии компетентно сделать это, необходимо постоянно держать руку на пульсе — систематически производить мониторинг парниковых газов на достаточно густой сети станций и анализировать в режиме *on line* поступающую с нее информацию. Жан Жак Руссо утверждал, что «закон необходимости с ранней поры учит человека делать то, что ему не нравится, дабы предотвратить зло, которое еще больше пришлось бы ему не по вкусу» [7]. Пора осознать, что забота о среде нашего обитания, контроль за ее текущим состоянием не прихоть, а жизненная необходимость. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проекты 02-05-65399 и НШ-1845.2003.05.

Литература

1. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Report №44. Geneva, 1999.
2. Сывороткин В.Л. // Земля и Вселенная. 1998. №1. С.21–27.
3. Бажин Н.М. Метан в атмосфере // <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/958.html>
4. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Report №37. Geneva, 1994.
5. Яговкина С.В., Кароль И.Л. и др. // Метеорология и гидрология. 2003. №4. С.49–62.
6. Yakushev V.S., Chuvilin E.M. // Cold Regions Science and Technology. 2000. V.31. P.189–197.
7. Энциклопедия мысли. Симферополь, 1996. С.331.

Поднятие Шатского: эхо важнейших событий мела и палеогена

198-й рейс «ДЖОИДЕС Резолюшн»

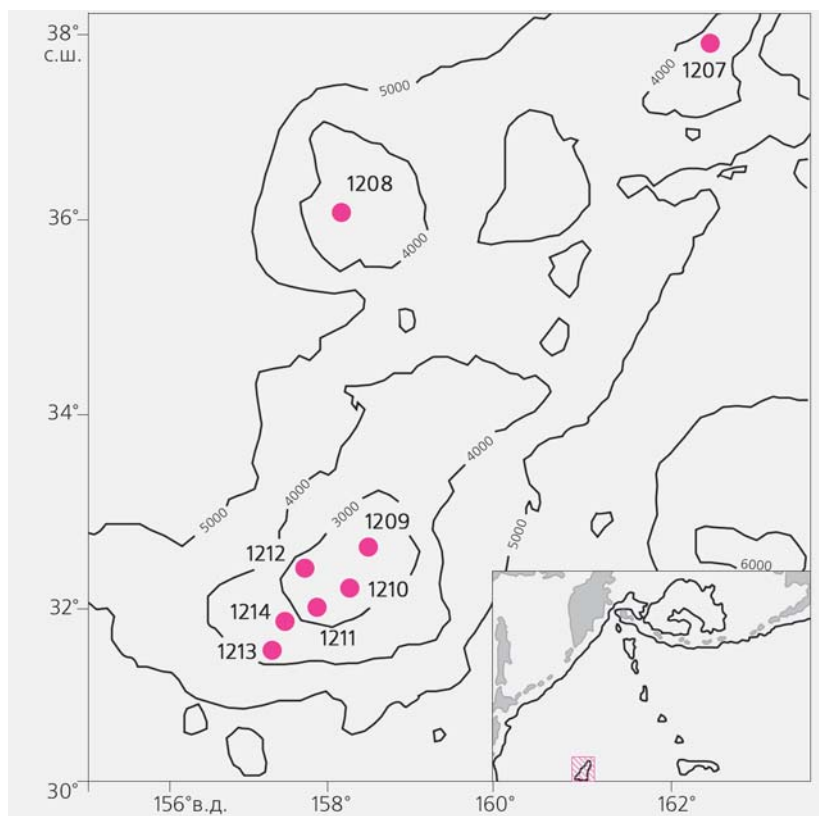
И.А.Басов,

доктор геолого-минералогических наук

Институт литосферы окраинных и внутренних морей РАН
Москва

Поднятие Шатского в северо-западной части Тихого океана представляет собой его древнейшее вулканическое плато. Проведившиеся здесь геолого-геофизические исследования, включая бурение и драгирование, а также различные палеорекострукции показали, что эта структура сформировалась в раннем мелу в экваториальных широтах Южного полушария на глубине около 1000 м или даже ближе к уровню океана. Позже вместе с Тихоокеанской плитой плато медленно двигалось в северо-западном направлении к его современному положению. Накопившаяся за это время осадочная толща содержит в себе запись разномасштабных геологических, океанологических и климатических событий, часть которых — отражение процессов, протекавших в Тихом океане, другие же имели глобальный характер.

Хотя бурение на поднятии Шатского проводилось ранее неоднократно, оно было приурочено к одному из трех его блоков — южному — и, как правило, сопровождалось низким выходом керна. По этой причине природа большинства из зафиксированных здесь событий и их соотношение с подобными событиями в других океанах и на континентах оставались неясными. Вместе с тем, уникальное географическое и бати-



Скважины, пробуренные в 198-м рейсе «ДЖОИДЕС Резолюшн». На врезке заштрихован район исследований.

метрическое положение поднятия позволяло надеяться на получение здесь полного сводного разреза верхнего мезозоя и кайнозоя, изучение которого современными методами может прояснить многие вопросы эволюции дна

Тихого океана, его осадочного чехла, водных масс и климата.

Именно с этой целью был проведен 198-й рейс «ДЖОИДЕС Резолюшн», который проходил с 27 августа по 23 октября 2001 г. под руководством Т.Дж.Брейлоуера

(Отдел геологических наук Университета Северной Каролины, США), И.Премоли-Силвы (Отдел наук о Земле Миланского университета, Италия) и М.Дж.Мэлони, научного представителя Программы океанского бурения [1].

В рейсе пробурено 16 скважин в восьми точках (1207—1214), расположенных на южном, центральном и северном блоках поднятия Шатского в интервале глубин 2387.2—3882.8 м. Наибольшее проникновение в породы (622.8 м) достигнуто в скважине 1207В на северном блоке. Самые древние осадочные породы (берриас) вскрыты скважиной 1213 на южном блоке, где они залегают на массивных диабазе и базальтах, представляющих собой не настоящий фундамент, а магматические тела внутри осадков. Полученный керн общей длиной 2914.43 м характеризует практически непрерывный разрез осадков от берриаса до плейстоцена (последние 130—140 млн лет).

Детальная реконструкция истории геологического развития, осадконакопления, гидрологического режима, климата и эволюции планктонной и бентосной биоты в данном регионе на протяжении мела и кайнозоя станет возможной после всесторонней обработки керна, который сложен, главным образом, карбонатными осадками, пригодными для проведения всех видов анализа, включая изотопный. Однако уже предварительное литологическое и палеонтологическое изучение керна выявляет последовательность наиболее значимых событий этого времени.

Обилие кремней с радиоляриями в нижней части осадочного разреза позволяет предполагать, что с момента своего образования и почти до конца кампанского века (приблизительно от 130—140 до 76—80 млн лет назад) поднятие пересекало в своем движении на северо-запад высокопродуктивную экваториальную зону, которая вероятно была существенно шире современной. В ранеаптское время

накопление карбонатно-кремнистых осадков было прервано событием, впервые обнаруженным в осадках Западной Атлантики — в следах океана Тетис. Оно получило название Первого океанского бескислородного события (Oceanic Anoxic Event). В разрезах скважин 1207 и 1213 это событие отражено пачками тонкослоистых бескарбонатных кремнистых пород мощностью соответственно 45 см и около 3 м с высоким содержанием органического углерода (до 34.7%). Такие полные разрезы осадков, накопившихся в условиях дефицита растворенного кислорода в придонном слое воды, вскрыты в Тихом океане впервые и свидетельствуют о поистине глобальном масштабе этого явления. В этих же скважинах отмечены следы и другого бескислородного события, которое имело место в позднем мелу на рубеже сеномана и турона (около 93 млн лет назад) и, вероятно, также носило глобальный характер.

Океанологически значимый феномен зарегистрирован в середине маастрихтского века (около 69 млн лет назад), когда в осадках нескольких скважин неожиданно исчезли остатки иноцерамов — крупных двустворчатых моллюсков. Причины этого явления остаются неясными, но поскольку подобное исчезновение наблюдается приблизительно на том же уровне и в других районах океана, оно обусловлено какими-то общими процессами, связанными, возможно, с изменением физико-химических свойств придонных вод.

Одним из важнейших достижений рейса стало получение в четырех скважинах (1209—1212) полных разрезов, пересекающих границу мела и палеогена, которая отчетливо фиксируется и хорошо сопоставима по литологическим, микропалеонтологическим, магнитным и другим признакам. Осадки непосредственно выше границы содержат примитивные мелкораквинные кайнозойские планктон-

ные фораминиферы и обильные микросферические минеральные образования, которые часто встречаются в пограничном мелу — палеогеновом слое других разрезов мира. Детальный палеонтологический и геохимический анализ хорошо сохранившихся и полных разрезов позволит получить дополнительную информацию о процессах на рубеже мезозоя и кайнозоя и стоящих за ними причинах.

Одно из наиболее значимых событий кайнозоя, отразившееся в осадочных разрезах поднятия Шатского, — резкий подъем уровня карбонатной компенсации (глубины, ниже которой происходит интенсивное растворение карбоната кальция) на рубеже палеоцена и эоцена, когда поверхностные воды характеризовались максимальными для всего кайнозоя температурами. Возможно, именно с изменением гидрологической обстановки на дне океана связана кардинальная трансформация в это время глубоководных сообществ бентосных фораминифер, отмеченная практически во всем Мировом океане.

Бурение на поднятии Шатского позволило впервые получить полные разрезы пограничных эоцено-олигоценых осадков, накапливавшихся в тропической области. Ранее осадки эоцена—олигоцена были вскрыты только в умеренных и высоких широтах Атлантического и Индийского океанов. Изучение полученных разрезов позволит в деталях проследить различные изменения в тропической части Тихого океана в ответ на резкое глобальное похолодание на рубеже эоцена и олигоцена.

Таким образом, в рейсе получены уникальные материалы, содержащие запись всех важнейших событий мела и кайнозоя. Их всесторонний анализ несомненно поможет создать адекватную модель гидрологической, климатической и биотической эволюции Тихого океана в позднем мезозое и кайнозое. ■

Литература

1. Bralower T.J., Premoli Silva I., Malone M.J. et al. // Proc. ODP, Init. Repts. 2002. Leg.198.

Судьба уровнемерных знаков Балтийско-Ладожского региона

В.И.Богданов

Более 300 лет не ослабевает внимание к феномену Фенноскандии, известному в разное время под названиями «вековое понижение уровня Балтийского моря», «смещение береговой линии», «последнее поднятие земной коры». Один из основных методов изучения этого явления — уровнемерный. До внедрения в практику наблюдений деревянных реек с футовыми делениями (футштоков) и самописцев (мареографов, лимниграфов) уровень моря измеряли от меток — знаков, нанесенных на приморские скалы, их иногда еще именуют марками (от англ. — old water marks). К концу XIX в. только российские гидрографы насекали на берегах и островах Балтийского моря и Ладоги около сотни знаков — все они до недавнего времени считались утраченными. Но в 2002—2003 гг. экспедиция Главной астрономической обсерватории РАН обнаружила несколько таких марок в современной российской части акватории Финского залива.

Историко-культурное значение этих находок несомненно. Но могут ли они быть полезными в современных научных исследованиях, когда уровень моря измеряют с помощью высокоточной наземной или спутни-



Владимир Иванович Богданов, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН. Начальник геодинамической экспедиции. Занимается проблемами геодезии, метрологии и, в частности, уровней Балтийского моря и Ладожского озера.

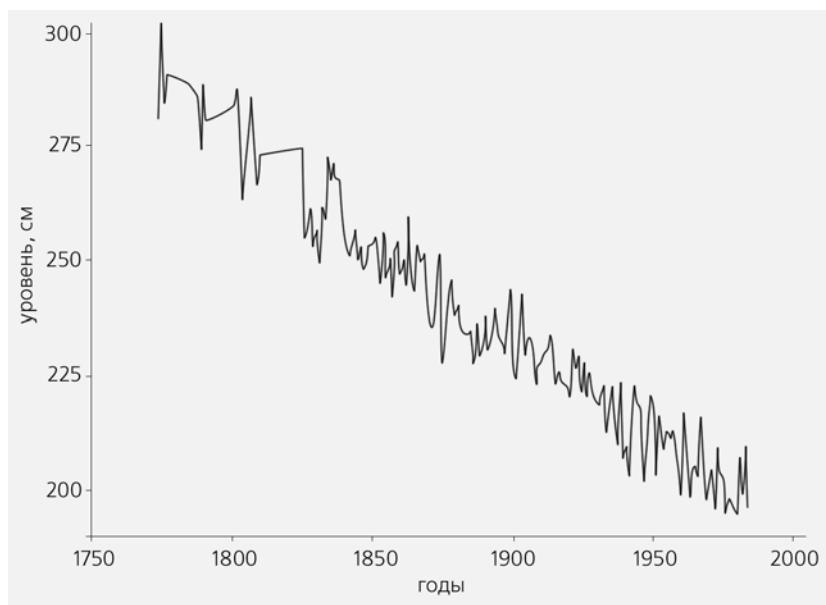
ковой аппаратуры? Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся сначала к некоторым теоретическим и историческим сведениям, касающимся нашей проблемы.

Немного теории и истории

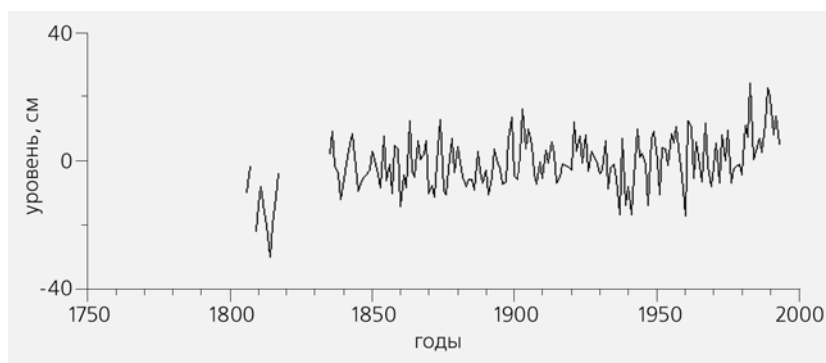
Известны два принципиально различных подхода к объяснению феномена Фенноскандии. Согласно одному из них, доминировавшему с конца XVII до начала XIX в., причина пони-

жения уровня моря — действительное уменьшение объема водных масс, согласно второму, понижение уровня — кажущееся, поскольку обусловлено поднятием земной коры.

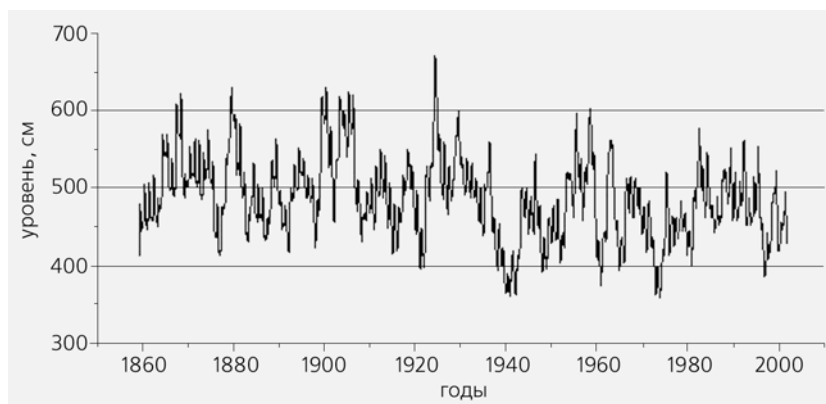
Существуют три основные гипотезы, претендующие на объяснение природы последнего явления. Первая, гляциоизостатическая, постулирует, что жесткая земная кора «плавает» на податливом субстрате по законам гидростатики, погружаясь в него, по мере роста ледниковой нагрузки, «всплывая», при ее уменьшении. Вторая свя-



Уровень Балтийского моря на Стокгольмском футштоке. Среднегодовой ряд наблюдений 1774—1984 гг. (по М.Экману, 1993).



Уровень Финского залива на Кронштадтском футштоке. Среднегодовой ряд наблюдений 1777—1993 гг. (по В.И.Богданову, 1997).



Уровень Ладожского озера на Валаамском уровнемерном посту (современная версия Гидрометеослужбы). Среднемесячный ряд наблюдений 1859—2001 гг. (по В.И.Богданову, Т.Г.Кравченковой, Т.И.Маловой, М.А.Маринич, 2002).

зывает поднятие региона с тектонической активностью Балтийского щита. Третья, комбинационная, предполагает совместное проявление тектонических и изостатических сил на фоне реального уплотнения и разуплотнения трещиноватой земной коры под воздействием меняющейся ледниковой нагрузки [1, 2]. Согласно всем гипотезам, чем ближе к вершине Ботнического залива (где располагался центр бывшего ледника), тем больше должна быть заметна тенденция к понижению уровня моря со временем, а в отдалении от центра такое понижение уровня практически не наблюдается. Эти предположения подтверждают уровнемерные ряды Стокгольмского и Кронштадтского футштоков, а также Валаамского водомерного поста на Ладожском озере. Не случайно эту акваторию, а также Белое море, планируют включить в программу инструментальных исследований Международного геодезического и геодинамического проекта «Уровень Балтийского моря» [2].

Первоначальные сведения о вековом понижении уровня Фенноскандии теряются в глубокой древности. Вплоть до XI в. Скандинавия считалась островом, в полном соответствии с ее названием, означающим в переводе с древнегерманского и готского «остров Скандия». При этом смещение ее береговой линии объяснялось понижением уровня Мирового океана. На рубеже XVII и XVIII вв. интенсивно формировалась общая картина этого удивительного явления. Наряду с представлениями выдающихся ученых того времени — И.Кеплера, А.Кирхера, И.Ньютона и др. — об эволюции подземной гидросферы, существующих в горах пустотах, повсеместном уменьшении вод и восполнении их веществом комет, бытовали многочисленные свидетельства местных жителей и рыбаков, мифический эпос скандинавских народов, библейское уче-

ние об «убыли» вод после Всемирного Потопа.

Старейший известный документ об отступании моря в Ботническом заливе — петиция граждан Эстхаммара, которую они подали архиепископу и регенту Швеции в 1491 г. с просьбой о переносе города, поскольку он стал недоступен даже для рыболовных судов [3]. Сведения об аналогичных явлениях приводятся и в книге финских проповедей 1621 г. [4].

Первая известная оценка скорости понижения уровня Балтики — 4–5 шведских локтя за 70 лет, т.е. ~3.8 см/год, — принадлежит Э.Сведенборгу. В 1743 г. А.Цельсий по сведениям об изменении высот тюленьих лежбищ на детально обследованном скальном острове подсчитал, что за 168 лет уровень понизился на 0.45 шведских десятичных дюймов в год (~1.3 см/год) относительно стабильного берега [3]. В 1731 г. он поручил насечь на гранитной глыбе Сварт Галлан, расположенной вблизи Лефгрунда, первую скальную метку «ординарного» (среднего) уровня, «дабы потомство тем лучше дело сие исследовать могло» [5, 6]. Однако представление об островной истории Швеции в прошлом затрагивало национальную гордость ее сограждан, и приводимые А.Цельсием и его сторонниками факты были объявлены ошибками наблюдений или действием ветров. К тому же обобщенные епископом Й.Броваллиусом новые материалы свидетельствовали о различном характере изменения уровня даже в близко расположенных пунктах, что противоречило распространенным тогда представлениям об одинаковом и синхронном характере колебаний уровня на ограниченных по размерам акваториях. Концепция стабильности земной поверхности на этом этапе оставалась доминирующей [7].

В дальнейшем превалировали идеи о кажущемся понижении уровня Балтийского моря

в результате поднятия земной коры. Например, вывод Л.фон Буха о том, что вся страна от Фридрихсгалда в Норвегии до Або в Финляндии и, возможно, до Санкт-Петербурга «медленно и нечувствительно поднимается», разделялся многими исследователями. С этого времени на смену концепции стабильности земной коры приходит концепция стабильности ординарного (среднего) уровня. В настоящее время, помимо векового поднятия Фенноскандии с максимумом ~1.0 см/год на севере Ботнического залива, установлены также горизонтальные деформации, долговременные колебания уровня различной природы, вариации силы тяжести; определены эквипотенциальная (геоид) и динамическая поверхности Балтийского моря [8].

Для оценки «убыли» моря

Дошедшие до нас сведения о наскальных метках, использованных в последующих измерениях для оценки «убыли» вод Балтийского моря, относятся к концу XVII в. [4]. В следующем веке их уже было немало, особенно в Швеции. В 1837 г. по инициативе К.М.Бэра Петербургская академия наук обратилась в Морское министерство с просьбой создать сеть таких марок, поручив эту работу М.Ф.Рейнеке. Академики А.Я.Купфер, К.М.Бэр и Э.Х.Ленц подготовили инструкцию, содержащую требования к выбору мест и определению локальных ординаров, к насечке наскальных меток и описанию мест их нахождения, а также к сбору и хранению материалов. Уже к 1851 г. существенное отставание России в этой области исследования было ликвидировано, и Рейнеке передал Ленцу материалы о 66 таких метках (их перечень опубликован в 1852 г.). К концу XIX в. на шведских, финских, российских и норвежских берегах было уже более

225 уникальных знаков и около десятка — на Ладожском озере.

Рейнеке начал выполнение этой работы с упорядочения футштоков в военных портах. Оказалось, что их нуль-пункты (нулевые отметки) «значительно не согласны с выводами среднего стояния воды в последние 15 лет, а именно: в Свеаборге нуль стоял выше последних средних выводов на 8.4 дюйма; в Ревеле на 2.6 дюйма; в Кронштадте на 6.9 дюйма (такое смещение связали со штормовой обстановкой наводнения 1824 г. — В.Б.); в Санкт-Петербургском Адмиралтействе на 2 дюйма». В июне 1840 г. все эти футштоки были «переставлены по последним выводам», а их нуль-пункты закреплены насечками на гранитных стенках каналов, набережных и на скале в Свеаборге [9]. К сожалению, преждевременная кончина Рейнеке не позволила довести начатые им исследования до практических рекомендаций. Однако его идея о необходимости фундаментального закрепления нуль-пунктов уровневых рек была поддержана позднее контр-адмиралом С.О.Макаровым: «Полагаю, что во всех местах, где производятся наблюдения над уровнем моря, должны быть высечены на скале вековые марки для того, чтобы при перемене <...> футштоков было бы по чему их устанавливать. Отсутствие вековых марок ведет к тому, что наблюдения одних годов нельзя сравнивать с наблюдениями других, а потому сделанные наблюдения остаются не обработанными, не принося никакой пользы ни мореплаванию, ни науке» [10].

Первое же свидетельство о регулярных водомерных наблюдениях в России и существовании до 1681 г. ординара в Ниеншанце (Ниене), находившегося в нижнем течении Охты при впадении ее в Неву, обнаружено в примечании на карте Э.Дальберга: «При буре с запада, севера и юго-запада вода у Ниена подымается на четыре лок-

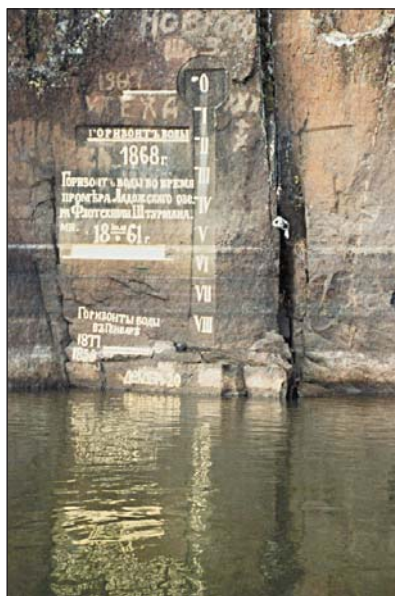
ты (~2.3–2.4 м. — В.Б.) выше обыкновенного и причиняет находящемуся там укреплению большой убыток» [11]. Несомненно, что наблюдения за уровнями водных бассейнов и рек, необходимые для оценки условий судоходства вдоль магистральных торговых путей, проводились в какой-то форме и ранее. Однако сведения о таких наблюдениях чрезвычайно скудны и схематичны (геодезические и гидрографические наблюдения стали привязывать к средним уровням морей, озер или рек в XVII в.). Возможно также, что они проводились в допетровское время в крепостях Нотеборг (Орешек, Шлиссельбург) и Кексгольм (Приозерск). Сведения об обычных уровнях широко использовались при обеспечении безопасного судоходства, при промерных работах, проектировании и строительстве фортификационных сооружений.

При решении вопроса о строительстве Петропавловской крепости Петр I, по всей вероятности, пользовался материалами об экстремальных уровнях Невы и ординаре в Ниеншанце. В 1703 г. государь уже был озабочен организацией аналогичных наблюдений у истока Невы и дал поручение Б.П.Шереметьеву «о вымерении Ладожского устья и как подымается полая вода». В XVIII в. уровнемерные наблюдения России были организованы во всех военных портах. В частности, в Кроншлоте они известны с 1707 г., в Петропавловской крепости — с 1715 г. В 1729 г. подобные наблюдения выполнялись также И.Г.Лейтманом на Фонтанке; в 1740 г. — Х.Э.Геллертом на Неве; в 1749–1777 гг. — Шрётером на Мойке, в 840 футах (~256 м) к востоку от Синего моста. На Кронштадтском футштоке регулярные наблюдения известны с 1806 г.; средние значения публиковались с 1815 г.; наблюдения XVIII в. обнаружены пока только за 1777 г. Тем не менее, последнее обстоятельство

во позволяет с полным основанием отнести Кронштадтский футшток к первой тройке мирового перечня обсерваторий с самыми продолжительными из сохранившихся рядами наблюдений за уровнем моря после Амстердамского (с 1700 г.) и Стокгольмского (с 1774 г.).

Российские наскальные футштоки

Особое место в исследованиях Балтийско-Ладожского региона занимали уникальные наскальные Бомарзундский и Валаамский футштоки. Первый из них, «единственный в своем роде стабильный», был создан отечественными гидрографами в небольшой бухте на скалах Аландского архипелага, вблизи недостроенной крепости, взорванной после поражения России в Крымской войне. Он сооружен зимой 1822 г., удлинен летом 1837 г. и состоит из двух шкал, образующих короткий и более длинный (более поздний) масштабы, разделенные на дюймы и оцифрованные футы.



Валаамский наскальный футшток (Ладожское озеро, Валаамский архипелаг).

Здесь и далее фото В.И.Богданова

Рядом на скале вырублена в три строки надпись: «1837.», «года.», «мая 31.». К настоящему времени он практически обсох, за исключением периодов осенних подъемов уровня моря [12].

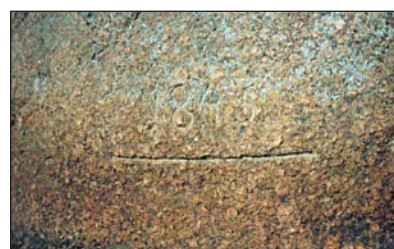
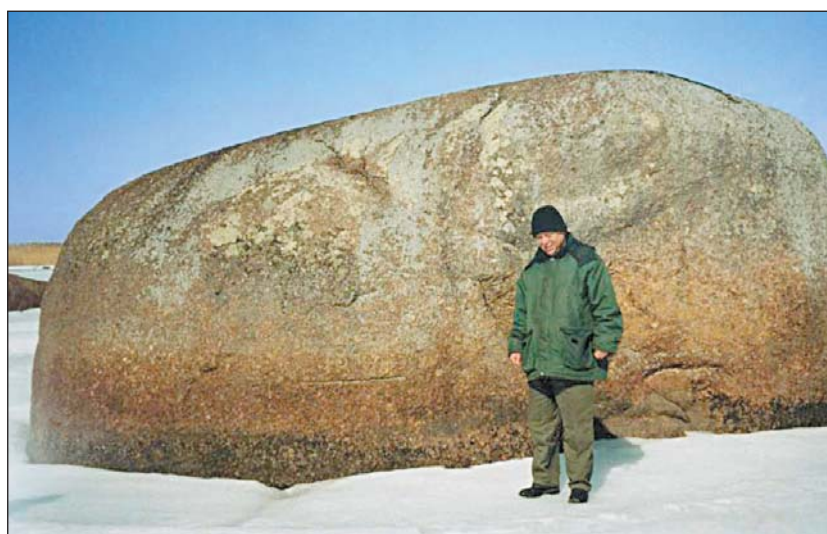
Другой наскальный футшток создан в 1858 г. на о.Валаам, на западном берегу Монастырской бухты, напротив Спасо-Преображенского монастыря, для организации долговременных и «правильных» наблюдений за уровнем Ладожского озера и обеспечения единообразных и точных промеров глубин в процессе экспедиции Гидрографического департамента. По словам начальника этих работ А.П.Андреева, на «гладкой отвесной каменной стене вырубили черту, соответствовавшую уровню озера, при котором производился промер около Валаама. От этой черты вверх и вниз выбили футы и дюймы, и на этом футштоке поставили «0» выше черты на 6 фут» [13]. Тогда же он объяснил инокам, как правильно измерять уровень по футштоку. К настоящему времени сохранились футовые деления, пронумерованные римски-



Наскальная метка ординара 1844 г. Остров Мощный. (Лист полевого журнала, 14.0×19.5 см, демонстрирует В.А.Солодов.)



Бьеркезундский наскальный футшток. Финский залив, о.Северный Березовый. Общий вид и шкала.



Метка ординара 1845 г. на камне в районе пос.Логи.

Общий вид камня с меткой ординара 1845 г. Бывшая «Репинская стойка», район пос.Логи.



Наскальная метка ординара 1845 г. Кургальский п-ов, р.Липовка.



Маргасов Камень. Остров Северный Березовый, Лоцманская бухта. Метка ординара 1835 г. утрачена в период до 1844 г.

ми цифрами, и следующие метки и надписи: 1) «Горизонт воды 1868 г.» — черта вырублена на отметке 2 фута по шкале на скального футштока; 2) «Горизонт воды во время промера Ладожского озера Флотскими Штурманами 10 июля 1861» — отметка по на скальному футштоку соответствует 6 футам 2 дюймам; 3) «Горизонты воды в Генваре»; 4) «1877 г.» — отметка по футштоку равна 9 футам; 5) «1859 г.» — отметка по футштоку равна 9 футам 4 дюймам. В 2001–2002 гг. обнаружены новые метки на этом футштоке. Точность его шкалы оказалась достаточно высокой, что показало сличение длин ее футовых делений, определенных в конце XIX и в начале XXI в.

Валаамский на скальный футшток до 1940 г. выполнял метрологическую роль опорного пункта на Ладожском озере. Однако современные измерения уровня озера не связаны непосредственно с ним. К тому же официальный ряд наблюдений искажен с 50-х годов многочисленными поправками в связи с переходами от локальной к абсолютной и от Гельсингфорской к Балтийской системам высот (в последнем случае на 0.06 м); изменением высот реперов по результатам многочисленных водных нивелирований (разброс результатов достигает 0.07 м); учетом «естественного поднятия острова по данным финских исследователей» (на 0.03 м).

В настоящее время разработаны мероприятия по возрождению этого уникального объекта. Наблюдения на нем, совместно с метеорологическими сведениями по региону, позволили последнему наблюдателю и архивариусу, монаху Иувиану (Красноперову Ивану Петровичу, 1880–1957) заблаговременно и мотивированно предсказать катастрофические Ладожское и Ленинградское наводнения 1924 г. Однако известные за полгода причины и высокая вероятность бедствия, и даже само

имя автора прогноза, тяжело переживавшего трагедию города, замалчивались в дальнейшем вплоть до XXI в. [14].

В 2003 г., благодаря сообщениям экспедиции Ботанического института РАН и Приморского краеведческого музея, удалось обследовать третий российский на скальный футшток в Балтийско-Ладожском регионе. Он насечен на крупной гранитной глыбе в центральной части о.Северный Березовый в Бьеркезунде (Финский залив). Помимо ординарной линии на камне обозначены штрихами футовые деления и год определения ординара «1844». Футшток и ныне может быть востребован в качестве действующего.

Из огромного числа меток ординаров XIX в., насеченных отечественными военными гидрографами в Финском заливе и центральной Балтике [9, 15, и др.], в современной российской части Финского залива должно было находиться одиннадцать. Часть из них — в южной и восточной его частях — была насечена на крупных каменных глыбах, другая — на скальных обнажениях коренных пород. В 2002–2003 гг. нам удалось обследовать несколько мест, где, по документам, они располагались. В 1835 г. на песчаном берегу о.Северный Березовый капитан корпуса флотских штурманов Маргасов вырубил метку ординара на огромной гранитной глыбе — однако знак не сохранился, по видимому, в результате естественного скола грани в период между 1835 и 1844 г. Четыре других знака в северной части Финского залива, насеченные в 1843–1849 гг., — в Выборгском заливе и к западу от него, — еще ждут своих исследователей.

В южной части залива мы обнаружили три крупных камня с отчетливыми метками ординаров на северо-восточном берегу Лужской губы (1845), в р.Липовка, в северной части Кургальского п-ова (1845) и на о.Мощ-

ный (1844). Последний представляет собой обсохшую глыбу. Поиски еще двух меток в этой части залива успехом пока не увенчались.

Роль меток XIX в. в современных научных исследованиях

Я уже отмечал, что внедрение в практику измерений уровня самописцев способствовало почти полному вытеснению метода эпизодических повторных измерений по на скальным меткам. Но проблема обеспечения стабильности нуль-пунктов футштоков и мареографов, закрепляемых на неустойчивых искусственных сооружениях или в областях, охваченных природными и антропогенными (техногенными) деформационными процессами, так и не была решена. Ни один нуль-пункт современного уровнемерного поста в Северо-Западном регионе России не отвечает требованиям долговременной и даже 10-летней стабильности, а в некоторых случаях и сохранности. Более того, расположенные рядом уровнемерные устройства, нивелирные реперы и знаки подвержены, зачастую, одним и тем же деформациям земной поверхности. Причем речь идет не о миллиметрах, а о единицах и десятках сантиметров [16].

В сложнейшей проблеме обеспечения долговременной репрезентативности и однородности прецизионных геодезических, геодинамических и уровнемерных наблюдений приоритет, безусловно, принадлежал и принадлежит измерениям, опирающимся на скальные реперы, марки, метки или литоглифические футштоки. Хотя одни и те же крупные глыбы или валуны могут быть устойчивыми в зависимости от гидрологической обстановки, природы и масштабов деформационных процессов, предпочтительнее все

же иметь дело с монолитными обнажениями коренных кристаллических пород.

Широкий спектр, значительные амплитуды и разномасштабный характер проявлений антропогенного фактора требуют поисков новых способов учета его влияния на вековые наблюдения, в том числе, и возврата к практике закрепления нуль-пунктов футштоков и мареографов наскальными метками.

Поскольку Санкт-Петербург, как и другие мегаполисы, оседает по разным причинам, интерес к этому вопросу возродился в процессе решения проблемы Кронштадтского футштока. Для улучшения репрезентативности наблюдений на нем в 1985—1988 гг. был построен Шепелевский дублер и сооружены три глубинных реперных поста скважинной конструкции для фундаментального векового закрепления нулей футштоков и мареографов в Кронштадте, Ломоносове и Шепелеве. Однако, к сожалению, их ввод в эксплуатацию никак не отразился

на качестве равномерных измерений в районе по программе, специально разработанной Академией наук.

Обнадеживает, впрочем, что в 2002—2003 гг. по договору с Управлением «Морзащита» Правительства Санкт-Петербурга были заложены GPS (Global Positioning System) пункты на каменных глыбах с метками ординаров XIX в. в Кургалове и в районе пос. Логи для привязки их к Государственной нивелирной сети и к пунктам национальной сети Международного геодезического и геодинимического проекта «Уровень Балтийского моря» в Кронштадте, Шепелеве, Выборге и на о.Логланд.

С позиций фундаментальной науки необходимы комплексные исследования на новой долговременной прецизионной метрологической и технической основе. Лишь при таком методологическом подходе возможно выйти со временем на более полный и совершенный уровень понимания закономерностей развития региона [17].

У наскальных футштоков и меток ординаров XIX в. есть будущее: в современных научных исследованиях их можно использовать как действующие объекты (Валаамский и Бьеркезундский футштоки); как устойчивые пункты (в случае подтверждения такой устойчивости) для закрепления нулей рядом расположенных равномерных реек и мареографов; в качестве контрольных нуль-пунктов при организации фундаментальных вековых наблюдений; и, наконец, в целях изучения векового тренда кажущегося или истинного понижения уровня Балтийского моря.

Думается, что необходима помощь гидрографических организаций стран Балтийского региона в поисках почти 90 российских марок XIX в., архивные сведения о которых автор передал ранее в геодезические организации Финляндии и Швеции, а также федеральная поддержка программы поисков и исследования в Балтийско-Ладожском регионе. ■

Литература

1. Николаев Н.И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М., 1988.
2. Bogdanov V.I., Kulinich A.V., Nikolaev N.I., Shustova L.E. Some aspects of studies of gravity field, geoid and phenomenon of Fennoscandia // Reports of the Finnish Geodetic Institute. 1999. №4. P.133—140.
3. Ekman M. A concise history of postglacial land uplift research (from its beginning to 1950) // Terra Nova. 1991. V.3. №4. P.358—365.
4. Bergsten F. The land uplift in Sweden from the evidence of the old water marks // Geografiska Annaler. Stockholm, 1954. Årg.36. H.1—2. S.81—111.
5. [Румовский С.]. Рассуждение о вопросе убывает ли на шаре земном количество воды или постоянно одно и то же количество ее? // Новые ежемесячные сочинения. 1786. Ч.V. С.12—39; Ч.VII. С.83—114.
6. Рундо А.М. Балтийское море в представлении гидрологов ныне и двести лет тому назад. Пг., 1922.
7. Богданов В.И. Эволюция представлений о стабильности земной коры в районе Санкт-Петербурга // Материалы Энциклопедической Библиотеки «Санкт-Петербург-2003». СПб., 1997. С.261—264.
8. Kakkuri J. (Ed.). Geodesy and Geophysics // Publ. of the Finnish Geodetic Institute. 1993. №115.
9. ПФА РАН. Ф.1. Оп.2—1851. Д.31. §304.
10. Извлечение из рапорта от 3 октября 1895 г. командующего эскадрой Средиземного моря контр-адмирала Макарова // Записки по гидрографии. 1896. Вып.17. С.84—90.
11. Гуппинг А.-И. Нева и Ниеншанц. СПб., 1909. Ч.II.
12. Ekman M. Postglacial uplift of the Åland Islands and World's Oldest Preserved Sea Level Gauge. Åland Islands // Publ. of the Summer Institute for Historical Geophysics. 1995. №1.
13. Андреев А.П. Ладожское озеро. СПб., 1875. Ч.1.
14. Богданов В.И., Кравченко Т.Г., Малова Т.И., Маринич М.А. // ДАН. 2002. Т.396. №5. С.672—675.
15. ПФА РАН. Разряд IX. Оп.1. Д.269.
16. Состояние равномерных наблюдений и проблема Кронштадтского футштока / Ред. Ю.Д.Буланже, В.И.Богданов, И.С.Граммберг, Н.Н.Лазаренко. М., 1986.
17. Богданов В.И. Формирование тысячелетних обсерваторских рядов как фундаментальная научная и техническая проблема // Физическая метрология: теоретические и прикладные аспекты. СПб., 1996. С.45—58.

Среди рифов и мифов

А.Ю.Журавлев

Большой Барьерный и другие

По-разному воспринимают рифы ученые. Биологов эти образования привлекают потому, что поддерживают удивительное природное разнообразие. Всего на нескольких десятках квадратных метров уживается больше полутора тысяч разных видов живых существ. Все они не просто сосуществуют, а составляют одну из самых удивительных экосистем, где каждая группа организмов (гильдия) строго выполняет присущие ей функции. Исчезновение всей гильдии или, наоборот, расширение в ней рабочих мест ведет к полному развалу системы. Для геологов рифы — прежде всего ловушки нефти и газоконденсата: найдешь ископаемый риф в определенной геологической обстановке и поддела, считай, сделано.

Конечно, изучение ископаемых рифов требует особого оборудования. Среди него выделяется «рифовый молоток» (или кувалда), так как рифовые породы, хотя и сложены известняками, намного плотнее обычных осадочных карбонатов. Еще при жизни строители рифов, обладавшие мощными известковыми скелетами, прочно срослись



Андрей Юрьевич Журавлев, доктор биологических наук, специалист в области палеонтологии кембрия. Был ведущим научным сотрудником в Институте палеонтологии РАН, затем работал в Министерстве природных ресурсов Российской Федерации, сейчас — главный редактор издательства «Бук Хаус». Монографии: «The Ecology of the Cambrian Radiation» (в соавторстве с Р.Райдингом; N.Y., 2000), «Atlas of the Evolving Earth» (Detroit, 2001), «Затерянный мир динозавров» (М., 2003). Неоднократно публиковался в «Природе».

между собой и укрепились в результате быстрой первичной цементации. Именно поэтому, разглядывая срезы рифов, организмы прошлого можно видеть в прижизненном положении и взаимосвязи друг с другом. Дополнительная прочность современных и ископаемых построек обеспечивается массивностью многих рифостроителей, поскольку организмы эти модульные, т.е. состоят из многих подобных себе элементов. Модульные виды крупнее своих одиночных собратьев, а кроме того более живучи.

Ископаемые рифы не вполне похожи на современные. Но и последние отличаются друг от друга. Под эгидой ЮНЕСКО были проведены сравнительные исследования карибских рифов Атлантики и рифов западной части Тихого океана, включая Большой Барьерный [1]. Оказалось, что, несмотря на сходство основных рифостроителей, эти экосистемы устроены по-разному. Тихоокеанские рифы развиваются в прозрачных, легко проницаемых для солнечных лучей водах. Эта даровая внешняя энер-

© Журавлев А.Ю., 2004

гия и используется строителями, причем не только водорослями и фотосинтезирующими бактериями, но и кораллами, и губками, и двусторчатыми моллюсками. В тканях всех перечисленных животных содержатся симбионты-водоросли, в основном, динофлагелляты зооксантеллы. (Зооксантелла в переводе с греческого значит «рыжее животное», поскольку содержит пигмент золотисто-оранжевого оттенка, а с помо-

щью жгутиков она способна передвигаться как настоящее животное.) Зооксантеллы не только обеспечивают своих хозяев своевременным и сносным питанием, но и ускоряют у них обызвествление скелета. Некоторые коралловые полипы настолько обленились, что не имеют щупалец и целиком зависят от своих сожителей, а воду, необходимую для выноса продуктов обмена, пропускают через дырки в теле, словно губ-

ки. Подобные рифы сосредоточены в тропиках, где освещенность не меняется от сезона к сезону. Стремясь к солнцу, т.е. к поверхности океана, они становятся волноломами.

Скелеты строителей рифов, даже еще живых, сами служат убежищами или пищей для множества разрушителей: сверлящих бактерий, водорослей, грибов, двусторчатых моллюсков, червей-сипункулид и др. В определенной мере рифы нужда-



Карибские рифы. Вид с поверхности и с глубины (на врезке). Ежи на этих рифах составляют гильдию выедателей, а сами кораллы бывают разной формы (внизу слева). Крупные брюхоногие моллюски — это хищники, которые борются с обрастателями (внизу справа). Массовый вылов моллюсков обрекает кораллы на гибель.

Здесь и далее фото автора



Плоды работы деструкторов. Они не менее важны для роста рифа, чем деятельность самих рифостроителей. О.Пуэрто-Рико.

ются в разрушении, поскольку личинки многих строителей прикрепляются только к твердым обломкам. Для разнообразных обростателей, особенно обызвествленных красных водорослей, коралловые скелеты также привлекательны. Хотя водоросли скрепляют коралловый каркас, делая рифы более устойчивыми к ударам волн, они же затевают фотосимбионтов, и коралл может зачахнуть. Поэтому на рифах существуют гильдии откусывателей (к ним относятся, например, рыбы-попугаи и рыбы-хирурги, названные так за необычные ротки), которые скусывают отдельные веточки, покрытые обростателями, и выедателей (таких как морские ежи), выгрызающих целые дорожки. Конечно, увлекшись, и те и другие могут сглотить весь риф, включая строителей. И над ними существует многоступенчатый контрольный аппарат из хищников — костных и хрящевых рыб. Многоступенчатое его устройство

обеспечивает устойчивость системы: если хищники высокого ранга не будут следить за хищниками более мелкого, те увлекутся и сожрут всех откусывателей и выедателей. Тогда риф покроется обростателями, фотосинтез и, следовательно, рост постройки замедлятся, и разрушители доведут всю систему до краха. Есть хищники, которые любят полакомиться самими коралловыми полипами: это улитки и морские звезды (особенно печально известна как разрушительница кораллов звезда терновый венец). За ними следят особые группы хищников, а также креветки и крабы, сожительствующие с кораллами.

При нашествии морских звезд крабы пугают их, щелкая широко расставленными клешнями, толкают, дергают за чувствительные органы и даже отстригают ножки, орудуя клешнями как ножницами. Сами крабы получают от своих хозяев крышу (и в прямом, и в переносном смысле) и питание. Кораллоядные улитки (например, кораллифила, имя которой и означает любительница коралла), подобно своим жертвам, сидят всю жизнь на одном месте, прикипев к коралловому скелету своей раковиной и запустив в один из полипов длинный, словно соломинка, хоботок, не спеша потягивают содержимое всей колонии. Роль пожирателей кораллов, если они, конечно, не передают своего любимого блюда, тоже не только отрицательная. Замечено, что они предпочитают потреблять наиболее многочисленные виды, сохраняя тем самым равновесие в видовом разнообразии [2].

Карибские рифы существуют в менее прозрачных морях. Прозрачность определяется прежде всего степенью развития в них растительного и бактериального планктона, тех микроскопических организмов, которые по воле волн и течений плавают у поверхности. Планктон же процветает, а еще хуже

(для рифа), если «цветет», когда вода насыщена биогенными веществами — органическими и неорганическими, растворенными и взвешенными соединениями азота, фосфора, железа и некоторых других элементов. Цветущий водоем несет гибель многим обитателям. Планктон затмевает солнце организмам, облюбовавшим дно, и они уже не могут целиком полагаться на солнечную энергию. Поэтому карибские кораллы живут не только за счет фотосимбионтов, но и сами улавливают растворенные и взвешенные в воде органические вещества. На таких рифах больше губок, т.е. фильтраторов. Менее заметны обростатели, которые сами нуждаются в солнечном свете, и в итоге риф более доступен разрушителям.

В совсем мутных водах, таких как у берегов Флориды, фотосимбионтные кораллы полностью исключены из рифостроения, поскольку мощный приток биогенов тормозит обызвествление, и постройки создаются губками да червями-трубкожилами.

По содержанию биогенных веществ водоемы разделяются на олиготрофные (бедные), мезотрофные (среднего уровня) и эвтрофные (насыщенные питательными веществами). Соответственно, и рифовые экосистемы приспособлены к разным уровням содержания биогенов: тихоокеанские рифы по-настоящему олиготрофны, карибские приближаются к мезотрофным, а флоридские можно назвать эвтрофными [3, 4].

Среди ученых по-прежнему нет единого мнения о том, что можно и что нельзя называть рифом. Никто точно не знает, откуда взялось само слово «риф»: то ли из старонорвежского или древнегерманского, то ли из арабского. Исследования рифов породило даже целое направление, которое практически сводится к словотворчеству. Выходят словари и справочники в несколько сотен

страниц, отведенных исключительно под термины, которые касаются рифов. Иногда создается впечатление, что сам объект исследования забыт напроочь, и главное как раз заключается в изобретении все новых и новых словосочетаний.

Понятно, что в области рифовой науки зародилось свое мифотворчество.

Миф первый: риф коралловый

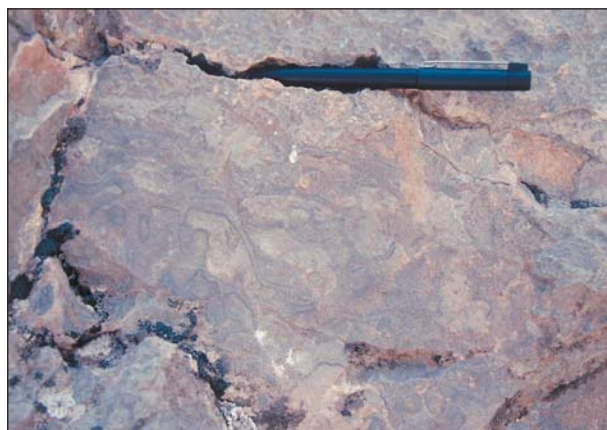
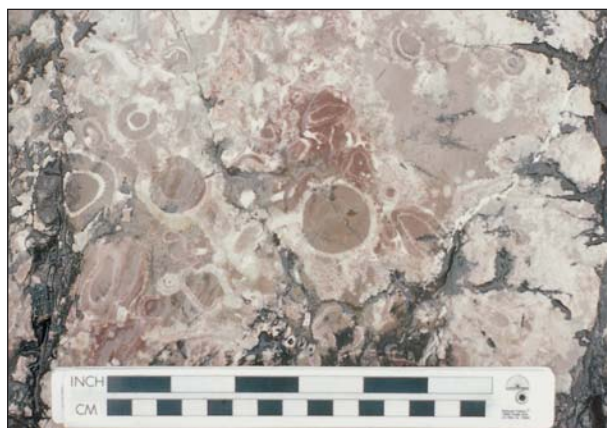
На первый взгляд с определением рифа все просто: волном, образованный взаимно сросшимися при жизни известковыми скелетами кораллов. Поэтому многие вымершие ископаемые организмы, замеченные в рифостроении, считали

кораллами. Так называли строматопорат, хететид и многих других вымерших рифообразующих животных и даже водоросли. Лишь в последние годы найдены современные родственники древних рифостроителей, а палеонтологи стали использовать физическое моделирование процессов, происходивших в организмах, от которых остались только скелеты. В результате выяснилось, что многие постройки были созданы губками [5].

До сих пор во многих научных сводках утверждается, что развитие рифовой экосистемы сопрягалось с существованием фотосимбионтов. Были такие организмы — строились настоящие рифы. А происходило это в раннекембрийский период, 545—510 млн лет назад; от вто-

рой половины ордовикского периода до франского века девонского включительно, 464—365 млн лет назад; с позднего каменноугольного периода до пермского, 323—248 млн лет назад; в поздне триасовое время, 227—206 млн лет назад; с позднеюрского периода до конца мелового, 159—65 млн лет назад; и в течение большей части кайнозойской эры, начиная от 45 млн лет назад доныне. Не было фотосимбионтов — не развивались и рифы (в промежутках). Однако, как уже отмечено, не все ископаемые, считавшиеся кораллами или кораллоподобными животными, были на самом деле таковыми.

Единство формы и содержания. Освещенность влияет на распределение кораллов по профилю рифа в зависимости



Рифы губковые. Те, что обнаружены в Якутии, созданы археоциатами (535 млн лет; вверху слева) и строматопоратами (430 млн лет; вверху справа). Иранский риф построен обыкновенными спикульными губками (510 млн лет; внизу слева). Гигантские иловые холмы на юге Франции (360 млн лет) — ныне версальский мрамор.

от их формы. Долгое время считалось, что четкое разведение по глубинам рядов коралловых форм обусловлено силой механического воздействия. Поэтому в бурной верхней зоне должны преобладать куполовидные и тарельчатые виды, а кажущиеся хрупкими ветвистые кораллы — располагаться поглубже. На самом деле зависимость фактически обратная. Просто у тарельчатых форм соотношение площади и объема тела таково, что на каждую объемную единицу приходится достаточное для ослабленного глубиной светового потока число фотосимбионтов. Да и механическая сопротивляемость наиболее распространенных ветвистых видов превышает таковую у тарельчатых. Сама же форма каждого вида закреплена генетически.

Миф второй: риф животный

Рифы существовали задолго до кембрийского периода, когда появились первые животные-рифостроители.

Докембрийские главы ископаемой летописи Земли действительно напоминают пачки ги-

гантских, как бы покособившихся от времени страниц. Эти каменные страницы — строматолиты (с греч. — покровные камни). Есть они и теперь, хотя намного меньше, чем прежде. Тонкая слоистость, которая служит определяющим признаком строматолитов, образуется в результате сезонной деятельности циано- и других бактерий в озерах и лагунах или водорослей и бактерий в морях, как на Багамской банке или в австралийском заливе Акул [6, 7]. (Однако смелые российские палеонтологи-экспериментаторы, которые строматолиты в глаза не видели, утверждают, что все они образуются исключительно бактериями [8].) Водорослевые строматолиты имеют более грубую слоистость и появились сравнительно недавно, в кайнозойскую эру. Слоистость отражает посменную работу сообщества строящих их организмов: одни просто улавливают слизью мелкие минеральные зерна и накапливают их; другие связывают и запечатывают в едином слое благодаря изменению параметров среды (кислотности и других характеристик) так, что оседают минеральные кристаллы.

Быстро растущие современные рифостроители — живот-

ные и водоросли — вытеснили сообщества микробов, образующих строматолит, в лагуны, где они способны создать лишь незамысловатые корки. Современный плачевный «образ жизни» строматолитов часто неоправданно служил для восстановления обстановок прошлого. Получалось, что в докембрии вместо морей и океанов были сплошные лагуны и озера. В действительности, когда микроскопическим, но обильным, образователям строматолитов никто не мешал, они делали все, на что были способны, отгрохав в докембрии постройки, превышающие по своим масштабам даже нынешний Большой Барьерный риф [9]. В таких рифах отдельные строматолиты высились в более глубокой части моря огромными конусами, в более мелкой — ветвились кустами и столбиками, и лишь на самом мелководье, как и ныне, были корками. Еще несколько раз (в конце кембрийского и девонского периодов и в начале триасового), после глобальных вымираний, сказывавшихся прежде всего на рифовой экосистеме, строматолитовые рифы вновь занимали высвободившееся морское пространство.



Риф строматолитовый (650 млн лет). Южная Австралия.

Миф третий: риф олиготрофный

Если разделить историю рифовых экосистем на периоды по преобладающим рифостроителям, начав с докембрия, получится такая цепочка: строматолиты—губки—строматолиты—губки—кораллы—строматолиты—губки—строматолиты—губки—кораллы—рудисты—кораллы. Представить, что все строматолиты жили в одно время, все губки — в другое, а кораллы — в третье, совершенно невозможно. По счастью, мы еще в состоянии отличить кембрийских губок от пермских.

Почему строматолиты возникали в те или иные эпохи, мы

уже поняли. Разделение современных рифов на олиготрофные и эвтрофные позволяет допустить, что содержание биогенов в Мировом океане могло меняться. Значит, губковые рифы отражают эвтрофное состояние океана, а коралловые — олиготрофное [4, 10]. Интересно, что наиболее крупные морские хищники, с существованием которых связывают определенную иерархию в хищнических отношениях, о чем уже говорилось, оказались современниками коралловых рифов. В конце ордовикского—девонского периода это были огромные головоногие моллюски и панцирные рыбы, в мезозойскую эру — морские ящеры, в кайнозойскую — костные и особенно хрящевые рыбы (акулы).

Выпадает из общего ряда только время рудистов. Но разве бывают правила без исключений? Рудисты — это вымершие двустворчатые моллюски, хотя на моллюсков они совершенно не похожи. Одна из створок у них превратилась в конический кубок, другая — в крышечку на кубке. И моллюск стал абсолютной копией типичного рифостроителя — коралла. Самые разные организмы в силу обстоятельств становятся похожими друг на друга. Конец мелового периода был одной из самых теплых эпох на планете, а сожительство кораллов и зооксантелл не выдерживает проверки на прочность даже при повышении температуры поверхностных вод всего на два—три градуса [11]. Поэтому можно представить, что рудисты просто заняли свободное от кораллов место.

Однако более вероятна другая связь событий. Как раз в то время, когда кораллы стали уступать уже насыщенное место рудистам, на суше, особенно в тропическом поясе, происходило вытеснение голосеменных растений цветковыми, приведшее к кризису всей наземной биоты в середине мелового периода [12]. А тип растительности во многом определяет сток



Риф рудистовый (80 млн лет). Армения.

биогенов в моря и участки океанов. Биомы суши, состоящие преимущественно из цветковых растений, поставляют в близлежащие водоемы в среднем в два раза больше нитратов, чем хвойный лес [13]. (В наше время вырубка лесов на п-ове Индокитай и, соответственно, резкое повышение биогенного потока привели к гибели значительной части рифов, приспособленных к олиготрофным условиям [1].) Сложная смена растительности на суше и основных рифостроителей в прибрежных морях произошла не впервые. Исчезновение олиготрофных рифов в конце девонского периода, возможно, было связано с бурным развитием на суше растительности, которое не могло не изменить характер стока биогенов. Именно растительность усиливает химическое выветривание, переводящее биогены в раствор, а в таком виде они сильнее воздействуют на морские экосистемы. Кроме того, начавшееся углекислотное накопление существенно понизило содержание в атмосфере углекислого газа. А это, в свою очередь, изменило тип обывествления с кальцитового, свойственного

большинству среднепалеозойских рифостроителей, на арагонитовый, на который они перейти не могли.

Таким образом, рифы — это наиболее четкий показатель былых и нынешнего состояний биосферы, гидросферы и атмосферы. Например, по преобладанию тех или иных типов карбонатных минералов в скелетах рифостроящих организмов и в осадке можно судить об относительном содержании углекислого газа в воздухе и о средних температурах моря.

Миф четвертый: риф неизменный

Не менее важно представлять и развитие отдельно взятого рифа, поскольку такое знание позволяет уловить общие закономерности в развитии систем. Последовательная, упорядоченная и достаточно направленная и поэтому до некоторой степени предсказуемая смена сообществ ведет к усилению биотического контроля над средой и становлению устойчивой экосистемы. Эта смена была названа сукцессией (с лат. — прием-

ственность, наследование). Сукцессионные закономерности стали использоваться намного раньше появления самого понятия в научном обиходе. Не менее ста веков насчитывает подсечно-огневой способ ведения сельского хозяйства, основанный на знании лесной сукцессии. Первые научные труды о сукцессиях были напечатаны Лондонским королевским обществом уже в конце XVII в., а в 1825 г. французский ботаник А.Дюро ввел и сам термин.

Если изучение современных сукцессий по-прежнему проводится на растительности, то смены сообществ давно минувших дней лучше всего поддаются осмыслению на ископаемых рифах [12, 14]. Обычно в рифовой сукцессии выделяют стадии стабилизации, колонизации, роста разнообразия и преобладания. На первой стадии (стабилизации) участок рыхлого дна заселяется чаще всего одиночными скелетными организмами. На их скелетах уже могут закрепиться первопоселенцы-рифостроители, поэтому вторую стадию еще называют пионерной. Вслед за пионерами участок осваивают уже самые разнообразные рифостроители,

обрастатели, разрушители и т.д. В течение третьей стадии общее разнообразие видов резко возрастает, отлагаются пищевые цепочки, усиливается значение различных симбионтов, а риф часто становится волноломом. На последней стадии общее разнообразие до некоторой степени снижается, но повышается устойчивость системы как единого целого к внешним воздействиям. Последнюю стадию также определяют как климаксную.

Устойчивость системы, в данном случае рифовой экосистемы, проявляется не столько в том, что она может вынести любое нарушение целостности под действием внешних сил, сколько в ее способности быстро вернуться в исходное состояние. Например, современные олиготрофные рифы мало чувствительны к разрушительному воздействию постоянных в тропических широтах ураганов. Риф восстанавливается в прежнем виде менее чем за десять лет и даже увеличивается в размерах за счет обломков рифостроителей, способных опять развиться в нормальные организмы [15]. (Для сравнения: саванная экосистема восстанавливается 20–40 лет, а широколиствен-

ный лес — около 100 лет.) Разброс обломков, составляющих большую долю объема в рифе, только расширяет его площадь. С каждой стадией рифовая экосистема делается все более устойчивой. Если во время стабилизации незакрепленное сообщество организмов может быть сметено обычными роющими животными («бульдозерный эффект»), то на последней стадии, в естественных условиях, рифу не страшны ни нашествия хищников, ни разрушители, ни мощные циклоны. Более того, рифовая экосистема сама начинает обустривать среду вокруг себя: в условиях голодных поверхностных вод развивается мощный источник продуктивности, риф проявляет себя как волнолом, изменяя при этом тип грунта, глубину и гидродинамику. Модульные же рифостроители за счет взаимного обрастания создают огромное пространство, которое и поддерживает столь необычно высокое разнообразие организмов.

В целом же опыт изучения рифовых экосистем показывает, что любые системы, конечно, восстанавливаются, но никогда не приобретают своего прежнего облика. ■

Литература

1. Differences between Atlantic and Pacific tropical marine coastal systems: Community structure, ecological processes and productivity / C.Birkeland. UNESCO. Paris, 1997.
2. Glynn P.W. Crustacean symbionts and the defence of corals: Coevolution on the reef? // *Coevolution* / M.H.Nitecki. Chicago, 1983. P.111—117.
3. Hallock P., Schlager W. // *Palaios*. 1986. V.1. P.389—398.
4. Wood R. Reef evolution. Oxford, 1999.
5. Журавлев А.Ю. Мир, которого не может быть // *Природа*. 1995. №12. С.21—28.
6. Riding R. et al. // *Geol. Mag.* 1991. V.128. P.227—234.
7. Riding R. // *Sedimentology*. 2000. V.47. Suppl.1. P.179—214.
8. Информационные материалы о деятельности Научного совета по палеобиологии и эволюции органического мира за 2002 г. М., 2003.
9. Reefs of Canada and adjacent area / H.N.G.Geldsetzer, N.P.James, E.Tebbutt. Can. Soc. Petrol. Geologist Mem. 1989. V.13.
10. The history and sedimentology of ancient reef systems / G.D.Stanley, Jr. N.Y., 2001.
11. Glynn P.W. // *Global Change Biol.* 1996. V.2. P.495—510.
12. Жерихин В.В. Избранные труды по палеоэкологии и филогенетике. М., 2003.
13. Likens G.E., Bormann F.H. // *Bioscience*. 1974. V.24. P.447—456.
14. Космынин В.Н., Геккер М.Р. Сукцессии на рифах // Рифогенные постройки в палеозое России / Б.С.Соколов, А.Б.Ивановский. М., 1997. С.117—136.
15. Hubbard D.K., Burke R.B., Gill I.P. // *Carbonates Evaporites*. 1998. V.13. P.3—9.

Трудная жизнь пернатых многоженцев

В.А.Паевский

Распустив крылья, выпятив грудь и надсадно чирикавая, воробей горделиво выступает перед самкой. Его избранница, притворяясь озабоченной поисками съедобных крошек на асфальте, временами с видимой угрозой кидается на ухажера, что ничуть не умеряет его любовный пыл. Весьма заинтересованные происходящим, к этой парочке присоединяются другие воробьи, и вскоре оглушительно чирикающая свора исчезает за ближайшими кустами. Типичная весенняя сценка на улицах большого города...

Птицы порой ведут себя столь театрально, что поневоле привлекают внимание даже тех людей, интересы которых весьма далеки от орнитологии. Специалисты же на примере птиц сформулировали важные закономерности в зоологической систематике, зоогеографии и экологии. Знаменитые этологи Конрад Лоренц и Нико Тинберген стали нобелевскими лауреатами, изучая именно эту группу животных. Тем не менее, брачные системы птиц и стратегия

© Паевский В.А., 2004
Начало. Окончание см. в №8.



*Как издевательски мудра природа —
Все эти птички, бабочки, поля!
Ведь все вокруг — для продолженья рода,
Для новой жизни, вечной, как Земля.
Все на продажу: гребни, шпоры, пенье,
Присоски, запах, цвет и бахрома,
И половые органы растений
(В быту — цветы), и их же аромат.
И все кругом — под знаком копуляций,
От битвы тигров до разлета спор,
И нет заминок в росте популяций,
Коль эффективен половой отбор.*

Владимир Александрович Паевский, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Зоологического института РАН. Область научных интересов — популяционная экология, биология и демография птиц. Автор книг: «Определение пола и возраста воробьиных птиц фауны СССР» (М., 1976, в соавторстве с Н.В.Виноградовой, В.Р.Дольником и В.Д.Ефремовым), «Популяционная экология зяблика» (Л., 1982, в соавторстве с В.Р.Дольником и др.) и «Демография птиц» (Л., 1985).

их размножения пристально начали изучаться лишь в последние десятилетия [1–8]. А ведь еще совсем недавно орнитологи не всегда могли ответить на простые, казалось бы, вопросы. Каковы детали птичьей любви и сексуальных походов? В каком возрасте они обзаводятся семьей и насколько крепки их семейные узы? Как у них обстоят дела с супружеской верностью, браками и разводами?

Свободная любовь, неразборчивость, проституция?

Хотя и говорят, что браки заключаются на небесах, но даже птицы вынуждены иногда спускаться на грешную землю. Как и у многих других животных, у птиц принято выделять четыре основных типа отношений между самцами и самками: моногамию (единобрачие), промиску-



Лесная завирушка, кормящая птенцов.

Фото В.В.Забугина

итет (совершенно свободные, ничем не регламентированные половые связи самцов и самок) и полигамию (многобрачие), которая разделяется на полигинию (многоженство) и полиандрию (многомужие) [1, 2, 5]. Но, как известно, нет правил без исключений. Временами на скользкий путь многоженцев могут встать некоторые строгие моногамы, что подтверждено генетическим анализом таких популяций: в них, как оказалось, всегда есть особи, появившиеся на свет в результате внебрачного оплодотворения [8].

Неожиданное разнообразие брачных связей было обнаружено у лесной завирушки (*Prunella modularis*), поселившейся в ботаническом саду Кембриджа [9]. Английские орнитологи, наблю-

дая в течение нескольких лет за размножением этой небольшой певчей птички, пришли к выводу, что наряду с моногамией как основной формой брака, в изучаемой популяции нередки случаи полигинии и полиандрии (до трех самцов у одной самки), а также замечен коммунальный брак (полигинандрия). Коммунальные семьи могут состоять из разного количества партнеров: чаще из двух самцов и двух самок, либо из двух самцов с тремя или четырьмя самками, а в одной семье было две самки с тремя самцами. И как обычно бывает у птиц (а может, и у всех животных), при всем разнообразии брачных связей в английской популяции лесной завирушки попадались и холостые самцы.

Спаривание на коллективных токах одни специалисты относят к промискуитету, а другие — к полигамии, поскольку в широком смысле слова так можно трактовать любое многобрачие, независимо, постоянны или же очень кратковременны связи самцов и самок. В некоторых систематических группах птиц, например, в семействе тетеревиных и отряде ржанкообразных (куда входят кулики, чайки, чистики) существуют все известные типы брачных связей.

Самый простой и, по человеческим меркам, аморальный тип отношений — промискуитет (от лат. *promiscuous* — смешанный, общий) биологи часто определяют как беспорядочное спаривание с разными партнерами. Однако слово «беспорядочное» здесь, видимо, не совсем точно, поскольку из всего многообразия потенциальных партнеров каждый выбирает все же наиболее для себя привлекательного. Более того, выбирают только самки, а они, в отличие от самцов, весьма привередливы. И чем разборчивее самки, тем, очевидно, ярче будут выражены у самцов именно те признаки, которые привлекают самок. Может, такой тип отношений, по аналогии с человеком, стоит считать проявлением свободной любви? Но тогда, правда, придется решать: чем у животных любовь к противоположному полу отличается от секса?

У «безбрачных» птиц встреча самца с самкой очень кратковременна — только для оплодотворения, а заботы о потомстве ложатся на одинокую самку. Примеров тому в пернатом мире немало: хорошо известные охотникам кулики вальдшнеп и дупель, а также многие полигамные птицы из отряда куриных, устраивающие коллективные брачные игры на токовищах, — наши глухарь и тетерев, американские луговой и острохвостый тетерева. Свободная смена половых партнеров свойственна и некоторым тропичес-

ким птицам — колибри и райским птицам, а также гнездовым паразитам, подобным нашей кукушке.

Колибри выделяется среди птиц не только размерами и красочным великолепием переливающихся оттенков оперения, способностью зависать в воздухе и мгновенно менять направление движения, при этом частота взмахов крыльев столь велика, что их движение невозможно увидеть, а их пульс может достигать более тысячи ударов в минуту. У этой самой крошечной птицы планеты обнаружено поведение, которое можно, пользуясь человеческими категориями, отнести к проституции.

Взрослые самцы колибри захватывают лучшие цветы и активно их защищают. Самки же вынуждены питаться на более бедных нектаром цветах. Орнитолог Л.Л.Вольф, изучая жизнь гранатового колибри на банановой плантации о.Доминика, заметил, что одна из самок, которую самец настойчиво отгонял от своих цветов, вдруг стала с ним заигрывать — принимать приглашающие позы, и самец не устоял [10]. После нескольких спариваний она получила явное покровительство самца, поскольку стала свободно кормиться на столь желанных, обильных нектаром цветах. Самое удивительное, что это происходило перед началом сезона гнездования, когда птицы еще не находились в состоянии полной физиологической готовности к размножению. Налицо явная схема древнейшей профессии — секс в обмен на пищу.

Душевные терзания

Во время брачного ухаживания, особенно на начальных этапах сближения с представителем противоположного пола, птица находится в состоянии внутреннего конфликта. Связано это с присутствием взрослым

птицам многих видов (но не всех!) чувством индивидуальной дистанции — зоны вокруг особи, в пределах которой она не терпит соседства другой птицы. Чтобы сохранить индивидуальную дистанцию, птица либо убегает, либо переходит к агрессии против того, кто нарушил невидимую границу. Агрессивность совершенно явственна даже у стайных птиц, получающих немалое преимущество от совместного обитания.

Терзания при первых попытках сексуального сближения, связанные с неизбежным нарушением индивидуальной дистанции, хорошо изучены на примере одной из самых многочисленных певчих птиц Европы — зяблика [11]. Эту небольшую птичку, чьи самцы хорошо заметны весной не только ярким оперением, но частой и громкой раскатистой песней, всегда можно встретить и в лесу, и в парке, и почти в любом городском саду. Самцы северных популяций прилетают весной со своих европейских зимовок значительно раньше самок, что и дало основание К.Линнею, великому шведскому биологу, основателю бинарной видовой номенклатуры, дать латинское название этой птице — *Fringilla coelebs*, что значит зяблик холостой.

При формировании брачной пары самцы зяблика принимают разные позы, детально описанные орнитологами. В начале ухаживания при виде самки он косо раскачивается из стороны в сторону, перья на его голове прижаты, голова втянута, белые пятна на плечах открыты, как при угрозе, ноги согнуты, крылья распушены, хвост подгибается вниз. Позднее самец выпрямляется, тело его немного откинута назад, хвост периодически приподнимается и круто опускается, перья на голове нахлещены, ноги выпрямлены. Ведет он себя несколько неуверенно — приближается к самке мелкими шажками и не прямо, а зигзагами. Видно, что самец

готов ко всему — и нападению, и бегству, и сексуальному контакту. Все зависит от самки, которая поначалу довольно пассивна, а затем принимает приглашающую позу, в чем-то похожую на позу птенца, выпрашивающего пищу: трясет крыльями и издает почти те же звуки, что и голодный птенец. Брачная церемония окончательно сближает партнеров, и за этим часто следует первая копуляция. У видов, в семьях которых птенцов выкармливают оба родителя, ритуальное кормление иногда превращается в настоящее, когда самец кормит самку, насиживающую кладку.

В процессе брачного ухаживания и многие другие обычные формы деятельности птиц могут приобретать формальный характер, далекий от их первоначальной функции. К ним относится и так называемый аллопрининг, т.е. взаимная чистка оперения. Уход за оперением составляет одну из важнейших черт повседневной жизни пернатых созданий, а потому любая помощь воспринимается весьма благосклонно. У некоторых птиц (например, попугаев, ткачиков и др.), взаимное ковыряние клювами в перьях друг друга — довольно частое занятие, особенно в период размножения. Птицы охотно предаются этой форме наслаждения — закрыв глаза, распуская перья, подставляя шею и обмякая всем телом, а при остановке партнера настойчиво требуют продолжения, показывая собственным примером, что надо делать.

Все описанные позы птиц и характер их поведения во время ухаживания свидетельствуют о том, что в результате одновременного воздействия разнообразных раздражителей птица вынуждена подавлять в себе все виды активности, кроме какой-то одной. В сезон размножения привычные формы поведения (агрессия, страх, осторожность и т.д.) отступают на второй план перед стремлением оставить после себя потомство.

Турухтаны и другие песочники

Какой бы привлекательной ни казалась жизнь экзотических птиц, но и в наших широтах можно увидеть удивительнейшие брачные церемонии и турнирные бои. Яркий тому пример — весенние схватки на токовищах турухтанов (*Philomachus pugnax*). Зимой их оперение ничем не отличаются от других куликов, весной же самцы надевают брачный наряд: на голове и шее, спереди и с боков, вырастают рассученные удлиненные перья и образуют вокруг головы «воротник» с огромными «ушами». Самое удивительное, что у каждого самца свой, сугубо индивидуальный маскарадный костюм, и найти два одинаковых по цвету «воротника» невозможно. Он бывает и рыжим, и черно-зеленым, и фиолетовым, и пурпурным, и оливковым, и самого невообразимого оттенка, с пятнами и полосками. В праздничных нарядах турухтаны собираются на облюбованных местах среди торфяных болот и заливных лугов (причем много лет подряд на одном месте), где и устраиваются токовые игры.

На каждом токовище свой лидер — самец с самым темным воротником. Он прилетает первым и зазывает пролетающих турухтанов (и самцов, и самок), принимая характерные позы — часто взмахивая крыльями и подпрыгивая. Слетевшиеся птицы занимают свои места, и стоит кому-нибудь из них, семеня и делая неожиданные повороты, нарушить невидимую границу, тут же начинается схватка. Два самца яростно насканивают друг на друга, подпрыгивая в метре над землей, бьют друг друга ногами и крыльями. Поединок длится всего несколько секунд и заканчивается так же внезапно, как и начинался. Только что жестоко сражавшиеся самцы могут стоять даже рядом с очень спокойным видом. Кто из них стал победителем, понять невозможно. Через некоторое время все повторяется, и обычно в парных драках участвуют одни и те же самцы.

Особое поведение присуще самцам с белыми воротниками [12]. В отличие от своих темных собратьев, они почти не проявляют агрессии и не захватывают территорий. Перелетая с тока на ток, эти своеобразные оппортунисты могут воспользо-

ваться моментом, когда зазевается самец-резидент, и спариться с одной из самок.

Самки в период размножения кажутся совершенно безучастными к происходящему, но это всего лишь игра. На самом деле, они внимательно наблюдают за схватками и оценивают сражающихся самцов, затем приближаются к избраннику, замершему иногда в причудливой позе с взъерошенными перьями, и осторожно касаются клювом его головы. Недалеко от места токовища обычно находят сидящих на гнездах самок турухтанов, и многие орнитологи полагают, что именно лидер приходится отцом большинству птенцов.

Турухтаны относятся к группе из 24 видов куликов, объединенных в подсемейство песочников. Эти мелкие и средние по размеру кулички, гнездящиеся в тундрах и других открытых северных ландшафтах, отличаются уникальным среди птиц разнообразием брачных отношений: есть и моногамия, и полигамия в разных вариантах, включая промискуитет, и особый тип брачных отношений — сдвоенное гнездование. Не менее разнообразно они заботят-



Турухтаны на току: самцы с темными воротниками (справа) и наблюдающая за турниром самка.

Фото М.Н.Иванова

ся о потомстве: насиживают и водят птенцов оба родителя, или насиживают оба родителя попеременно, но затем или самец, или самка оставляют выводок, или же, наконец, все заботы о потомстве сразу берет на себя один брачный партнер.

Два родственных вида куликов, дутыш (*Calidris melanotos*) и острохвостый песочник (*C. acuminata*), обитают летом в тундрах Восточной Сибири, а зимуют в Австралии. Для них характерно такое многоженство, которое некоторые орнитологи считают полигинией, а другие — миксогамией, т.е. смешанным сожительством [13]. Самцы притаиваются раньше самок и занимают территорию, которую ревностно охраняют. Они готовы овладеть каждой самкой, пролетающей через их участок, причем преследуют любую птицу, хоть отдаленно напоминающую самку своего вида. А чтобы склонить ее к спариванию, исполняют особый ритуал — держат тело горизонтально, поднимают хвост, раздувают горловой мешок и разводят крылья в стороны, издавая громкие звуки, ускоряющиеся при нарастании возбуждения. Каждый самец покрывает неограниченное число самок, которые вскоре после копуляции могут продолжить пролет. Вся система брачных отношений этих куликов направлена, таким образом, на участие в воспроизводстве популяции максимального числа самок.

Самый уникальный тип брачных отношений среди мелких куличков — у белохвостого песочника (*C. temminckii*) — описал финский орнитолог О.Хильден. Самка последовательно спаривается с двумя самцами на разных гнездовых территориях и откладывает две кладки яиц: одну насиживает сама, а другую — ее партнер, но прежде чем сесть, он должен спариться со второй самкой. Таким способом каждая пара песочников удваивает свои возможности по выведению потомства.



Самка белохвостого песочника с птенцом.

Фото М.Н.Иванова

Ток глухарей и тетеревов — классика полигамии

Одни из самых эффектных брачных ритуалов — коллективные демонстрации тетеревиных птиц на токовищах. В равной степени это относится и к тетеревам, и к глухарям. Глухариные

тока, весьма постоянные из года в год, расположены обычно в сосновом или смешанном лесу, часто на окраине болота, где глухари собираются во время весеннего таяния снега.

Настоящее утреннее токование начинается еще в полной темноте, до рассвета. Песнями это можно назвать с некоторой



Токующий глухарь.

Фото В.В.Забугина



Самцы тетеревов перед боем.

Фото М.Н.Иванова

натяжкой, поскольку вначале глухарь издает постепенно учащающееся горловое щелканье («тэканье»), после чего следуют звуки, очень похожие на точение ножа («точение»). К тому моменту он уже настолько возбужден, что ничего не слышит или же просто ни на что не обращает внимания. Именно во время «точения» охотники и подкрадываются к глухому великану. Глухари западноевропейских популяций, а также американский полынный тетерев, между щелканьем и «точением» издают звук, неотличимый от звука выскакивающей из горлышка бутылки пробки. Для этого тетерев раздувает до огромного размера эластичный шейный мешок и резко его сжимает.

Токующие глухари с широко и веерообразно раскрытым хвостом, с высоко задранной головой и раскрытым светлым клювом, с распушенными крыльями находятся в состоянии, которое можно назвать яростным иступлением. Прогоняя соперников со своего участка, они временами так ожесточаются, из-

бивая друг друга клювами и крыльями, что их стычки доходят до кровавой драки.

Глухарки слетаются на рассвете и сразу же окружают самых сильных глухарей, занимающих верх глухариной иерархии и центр ристалища. Тут же происходит и спаривание, после чего самки покидают ток.

Американский луговой, или степной тетерев, раздувая и опуская свой шейный мешок, веером распустив хвост и потряхивая воротником из белых перьев, гордо вышагивает взад и вперед в центре тока сквозь группу покорно ожидающих самок и время от времени копулирует с ними (с несколькими десятками самок за сезон). Так ведут себя не все самцы. Большинство (молодые и неопытные либо более слабые, оттесненные из центра тока) лишь робко наблюдают за происходящим. После копуляции самки сразу же улетают, удаляясь от тока на большое расстояние.

Наш полевой тетерев на токах, расположенных на окраине поля или участках верховых болот, начинает бормотать уже во

время первых оттепелей. Крупные иссиня-черные краснобровые птицы с поднятыми эффектно лирообразными хвостами, наклонив головы и раздувая вытянутые шеи, приседая и подскакивая, сталкиваясь временами с раскрытыми клювами в напряженной драке, в момент наивысшего возбуждения самозабвенно шипят (чүфыкают), но в основном бормочут. Драки тетеревов, несмотря на внешний азарт и явную агрессию, никогда не приводят к большим травмам. Пестрые юркие тетережки, откликаясь на музыку тока нежно звучащим квохтаньем, в рассветных сумерках спускаются на истоптанную танцевальную площадку, чтобы спариться с могучим избранником-победителем, после чего улетают в ближайшие заросли.

Существовало много разных оценок биологического значения полигамии и группового токования у тетеревиных птиц. Большую полемику вызывал вопрос о целесообразности предпочтения самками всего лишь нескольких самцов. Предполагалось, что связано это с разными сроками наступления половой зрелости: у полигамных видов тетеревиных птиц самцы созревают позже самок (сексуальный биматуризм). Однако не все орнитологи разделяли подобное мнение, поскольку замечено, что пока старые глухари и тетерева тратили время и силы на драки и токование, некоторые молодые самцы под шумок копулировали с самками. Явление назвали возрастным кроссом и стали считать специальной адаптацией, так как предполагали, что спаривание молодых самцов со старыми самками и, наоборот, старых — с молодыми наиболее благоприятно сказывается на жизнеспособности потомства. На самом деле все оказалось много проще.

Право окончательного выбора всегда остается за самками, а их, как показали более тщательные исследования с учетом всех взаимодействий птиц раз-



Во время турнирной схватки.

Фото В.В.Забугина

ного пола и возраста, привлекают самые зрелые и опытные самцы в возрасте трех-четырёх лет. Например, на тетеревином току в Финляндии, где было 10 косачей и 24 тетерки, один, по-видимому, главный тетерев-иерарх, спарился с 17 тетерками.

В чем же преимущества брачной жизни такого типа? Как считает специалист по тетеревиным птицам Р.Л.Потапов, ток — сложный воспроизводящий механизм, созданный и от-

шлифованный естественным отбором [14]. Свободный выбор самками партнеров обеспечивает генетическую чистоту и наилучшие качества потомства, поскольку самцы с какими-либо недостатками, а также молодые, не достигшие сексуального расцвета, не участвуют в размножении. Столь желанная для многих людей весенняя охота на токующих глухарей самым жесточайшим образом нарушает выработанный тысячелетиями природ-

ный порядок воспроизводства популяции.

Токование у птиц, относящихся к разным систематическим группам, несомненно, имеет важнейшее биологическое значение и заключается в том, что при промискуитете просто необходимо иметь место, где одновременно могли бы находиться половозрелые самцы и самки. Ведь токовище сочетает в себе функции и плаца для церемониальных парадов, и ристалища, и танцевальной площадки, и даже брачного ложа. Именно поэтому место тока бывает постоянным из года в год. Известны примеры, когда токовище неизменно располагалось в одном и том же месте в течение даже нескольких десятков лет.

«Узаконенное» многоженство и многомужие

Довольно трудно сказать, соответствует ли наше понятие «многоженство» явлению, которое мы видим у некоторых птиц-полигамов. Социальные системы многоженства (полигинии) и многомужия (полиандрии) у птиц бывают разными по такому главнейшему признаку, как бремя забот о потомстве, т.е. насиживание яиц и выращивание птенцов. У одних полигамов это делают только самки, у других — только самцы, а у третьих — птицы обоего пола.

У орнитологов нередко возникают трудности с терминологией при описании всех форм брачных отношений. Если у самца есть целый гарем, то этот самец — многоженец, и систему брака нужно отнести к полигинии, но если самки из гарема, отложив яйца чадолобивому самцу, переходят к следующему столь же заботливому папаше и спариваются с ним, то это уже — многомужие, т.е. полиандрия.

И классификация, и терминология разных систем брач-

ных и сексуальных связей многоступенчата. Настоящую полигамию называют полигинией в случае, когда самец образует пары более чем с одной самкой, и полиандрией, когда самка спаривается более чем с одним самцом. Обычно различают две формы полигинии — гаремную и территориальную. Полиандрию же подразделяют на классическую, когда вся забота о потомстве ложится на самца, и кооперативную, когда самки наряду с отцом принимают участие в заботах о птенцах. Классическая полиандрия характерна для водно-прибрежных птиц, таких как яканы и плавунчики, а кооперативная встречается у разных птиц — некоторых дятлов, хищников, пастушков и певчих воробьиных.

И полигиния, и полиандрия могут сочетаться одновременно, если одна птица сразу спаривается с несколькими партнерами, сохраняя с каждым временную или постоянную связь, и последовательно, если птица образует пару со следующим партнером после того, как предыдущий начнет насиживать кладку. Как и все классификации, такое разделение несколько условно, и иногда невозможно отличить, например, последовательную гаремную полигинию от промискуитета, т.е. ничем не регламентированных половых связей.

Типичные многоженцы и земельные собственники — австралийские птицы-лиры, или лирохвосты (*Menuridae*), внесенные в Красную книгу МСОП. Эти птицы обладают не только длинным хвостом весьма эффектной формы, но и поразительным голосом. Они быстро бегают в лесных зарослях и редко пользуются крыльями.

Во время брачного сезона самец захватывает большой (4—12 га) лесной участок, на котором расчищает от опавших листьев и взрыхляет ногами несколько «концертных» площадок, и в центре каждой сооружает земляной холмик. С холмиков

начинаются бесконечные призывные брачные песни, в которые вплетаются самые разнообразные заимствованные звуки. Самец имитирует не только элементы песен своих соседей по лесу — попугаев, сов, зимородков, но и собак, овец и лошадей, а также стук топора, скрежет пилы, звон колокола и даже щелканье затвора фотоаппарата. Вся эта богатейшая вокализация обращена к его потенциальным супругам, которые занимают расчищенные площадки.

Регулярно посещая свои владения, самец спаривается со всеми привлеченными женами. Каждая из них на земле или невысоко над землей строит крытое сверху, с боковым входом гнездо, в которое откладывает единственное серенькое яйцо и в полном одиночестве насиживает его в течение полутора месяцев. Концертирующий отец совершенно не проявляет интереса к своим детям, и вся забота о них лежит только на самках.

У американского кулика, называемого пятнистым перевозчиком, брачные отношения развиваются в типичной форме одновременной полиандрии. Очень активные самки захватывают и ревностно защищают гнездовые территории от соперниц, ухаживая одновременно за представителями мужского пола. Как только самка отложит яйца, ее пассивный партнер безропотно садится их насиживать, а она там же привлекает к себе другого самца. Первый самец иногда проявляет нечто вроде ревности, выказывая агрессию второму избраннику своей ветреной супруги, но она сразу пресекает эти попытки. Решающий фактор образования супружеского трио — качество территории, захваченной самкой. Некоторые самые сильные самки, обладающие наиболее заманчивыми «латифундиями», могут привлечь к себе даже трех самцов и каждого усадить на кладку. А ведь где-либо рядом, в наихудших участках обитания популяции, некоторые самки на

весь сезон остаются незамужними, не сумев завладеть даже одним партнером.

Среди хищных птиц также встречается полигамия. У галапагосского канюка, например, наряду с обычными моногамными парами, были обнаружены и полиандрические гнездовые группы. Одна самка одновременно покорила сразу четырех самцов, которые не только спаривались с ней, но и вместе строили гнездо, куда она откладывала яйца. Поскольку самки участвовали вместе с отцами и в выкармливании птенцов, группировки были названы кооперативной полиандрией. В популяции были негнездящиеся самки, но не было холостых самцов.

Одновременная полиандрия присуща яканам — тропическим длинноногим птицам с пальцами огромной длины, позволяющим им ловко бегать по плавающим листьям на поверхности пресных водоемов. Гнезда яканы строят на заламах стеблей водных растений, прямо на глади воды, а вылупившихся птенцов в моменты опасности переносят под крыльями. Некоторые яканы — моногамы, но большинство видов имеют истинные, т.е. одновременные полиандрические связи. У американской желтолобой яканы самки почти вдвое крупнее самцов и окрашены гораздо ярче — рыжие со светлыми крыльями. Каждый самец занимает индивидуальный участок, где и сооружает гнездо, но самка захватывает несколько территорий вместе с мужьями и откладывает каждому из них яйца, которые самцы исправно насиживают в течение почти месяца. При появлении хищника или же чужой самки самец начинает истошно кричать, и ему на помощь прилетает его супруга, чтобы совместными усилиями прогнать непрошенных гостей. Как правило, в популяции есть холостые самцы и самки, которые не смогли привлечь к себе птиц противоположного пола.

Полигамия в форме полигинии, плавно переходящей в полиандрию, весьма эффективна у крупных нелетающих птиц — нанду, или южноамериканских страусов. Хотя у всех бескилевых птиц, обитающих на разных континентах и называемых в просторечии страусами, основную заботу о кладке и птенцах проявляют самцы, насиживая яйца от одной или нескольких самок, только у нанду существует настоящая гаремная полигамия.

По наблюдениям орнитолога Д.Бранинга, в Аргентине в зимние месяцы нанду мирно живут в стаях [15]. Когда же в конце сентября в пампасы приходит весна, с самцами происходят резкие перемены. Они начинают двигаться напыщенно, раздувая темнеющие к весне перья и задирая своих конкурентов. Взаимная агрессия самцов, однако, никогда не доходит до драк «не на жизнь, а на смерть». Сцепившись клювами, с переплетенными шеями, они яростно толкаются, стараясь свалить друг друга, пока более слабый не убежит от победителя. Победитель незамедлительно сзывает всех находящиеся вблизи самок. Один взрослый самец завладевает гаремом из нескольких (3–15) жен и спаривается

с каждой из них, по крайней мере, один раз в два-три дня.

Этот многоженец оказывается очень заботливым отцом. Он выкапывает неглубокую ямку в земле, выстилает ее травой и приглашает к гнезду своих жен отложить туда яйца. Как только в гнезде окажется несколько яиц, самец садится их насиживать. Самки же с удивительной регулярностью продолжают откладывать яйца — каждая из них ровно через день осторожно приближается к насиживающему самцу, откладывает огромное (до 700 г) яйцо прямо на землю перед носом внимательно наблюдающего за процессом папаша, и с чувством исполненного долга быстро убегает. Самец осторожно закатывает клювом очередное яйцо под себя и продолжает рутинную работу. Когда через семь—десять дней в гнезде окажется 20–50 яиц (в зависимости от размера гарема), самец больше не подпускает к нему своих ветреных подруг, отгоняя их громким устрашающим шипением. Весь его гарем, держащийся обычно вместе, небольшим табунком, тут же перебежит к другому самцу, и все повторится. Каждая такая сплоченная группа самок может откладывать яйца не двум—трем, а иногда десяти—двенадцати самцам.

Насиживать яйца приходится долго — больше месяца, и многие кладки гибнут. Чаше всего такая участь постигает кладки последних в очереди самцов, к которым табунок самок приходит позже всех. Природных врагов у взрослых нанду нет, за исключением человека (охота на этих птиц в XIX в. существенно сократила их численность), а яйца и птенцы — лакомая добыча опоссумов и хищных птиц, если поблизости не окажется заботливого отца. Самец, охраняющий свой выводок, агрессивен и опасен даже для всадников, поэтому аргентинские пастухи очень осторожны в это время года.

Конечно, столь необычная система размножения могла развиваться только как механизм для обеспечения максимальной плодовитости. Ни отдельные моногамные брачные пары, ни многоженство, при котором каждая самка насиживала бы свою кладку, как у лирохвостов, ни «двоенное гнездование», как у белохвостого песочника, не смогли бы обеспечить производство столь многочисленного потомства. Безусловно, в мире пернатых существуют и другие способы надежного воспроизводства, но об этом мы расскажем в следующем раз. ■

Литература

1. Emlen S.T., Oring L.W. // Science. 1977. V.197. P.215—223.
2. Oring L.W. // Avian Biology. 1982. V.6. P.1—92.
3. Emlen S.T., Vebrencamp S.L. // Perspectives in Ornithology. Cambridge, 1983. P.93—127.
4. Ford N.L. // Current Ornithology. 1983. V.1. P.329—356.
5. Панов Е.Н. Поведение животных и этологическая структура популяций. М., 1983.
6. Oring L.W. // Current Ornithology. 1986. V.3. P.309—352.
7. Westneat D.F., Sherman P.W., Morton M.L. // Current Ornithology. 1990. V.7. P.331—369.
8. Wink M., Dyrce A. // Acta ornithol. 1999. V.34. P.91—109.
9. Davies N.B., Lundberg A. // J. Anim. Ecology. 1984. V.53. P.895—912.
10. Wolf L.L. // Condor. 1975. V.77. P.140—144.
11. Популяционная экология зяблика / Ред. В.Р.Дольник. Л., 1982.
12. Панов Е.Н. Бегство от одиночества. Индивидуальное и коллективное в природе и в человеческом обществе. М., 2001.
13. Флинт В.Е., Томкович П.С. // Труды Зоол. музея МГУ. 1978. Т.17. С.73—118.
14. Потапов Р.Л. Тетеревиные птицы. Л., 1990.
15. Bruning D. // Animal Kingdom. 1971. V.74. P.22—27.

Архивные SMS-ки

«Не вижу в нем надобности для СССР...»

Где-то в дневниках Борис Эйхенбаум, известный пушкинист и литературовед, посетовал на «нехватку» биографии. Мол, университет, книги, семья — вот, собственно, и все, что «случилось» в его интеллигентской жизни. Судьба Владимира Александровича Костицына (1883—1963), математика, астрофизика, эколога, отличалась такой насыщенностью событиями, которая достойна самого высокого романа*. В начале века социал-демократ, организатор боевых партийных дружин, он близко общался с В.И. Лениным, но отказался войти в ЦК большевиков; после революции 1917-го высокий советский чиновник от науки — член коллегии возглавившегося Н.П. Горбуновым Научно-технического отдела ВСНХ, профессор математики и заведующий научным отделом Главнауки Наркомата просвещения РСФСР. Казалось бы, Владимиру Александровичу, имевшему репутацию «левого» профессора и авторитет среди большевистских вождей, была обеспечена вполне благополучная жизнь и карьера. Возможно, именно хорошее знание потаенных законов партийной жизни подсказало Костицыну о приближающейся опасности, и в 1927 г., выехав в командировку во Францию, он уже не вернулся в СССР. После окончания второй мировой войны, как многие его соотечественники, Костицын подал заявление в советское посольство в Париже и получил заграничный паспорт советского гражданина, однако поехать на родину так и не решился.

Между тем в его довоенной биографии был любопытный факт,

* Подробнее см.: Незнакомый Костицын // Российская научная эмиграция: двадцать портретов. М., 2001. С.28—56; см. также: Природа. 2001. №4.

возможно, частично объясняющий причины такого решения. В 1940 г. Костицын отправил из оккупированного нацистами Парижа письмо вице-президенту АН СССР Отто Юльевичу Шмидту с просьбой о содействии возвращению на родину. Когда-то именно Костицын ввел молодого Шмидта в круг московских математиков... Считается, что установки — «разрешить или отказать» — всегда предписывались с самого «верха», однако сохранившееся письмо Костицына и резолюция на нем О.Ю. Шмидта показывают, что это не так; немалое значение имела и позиция властных представителей самого научного сообщества.

Париж, 22 декабря 1940 г.
Глубокоуважаемый Отто Юльевич!

Пользуюсь представившейся оказией, чтобы послать Вам это письмо, ибо всякими иными путями писать невозможно.

Я хотел бы положить конец создавшемуся недоразумению и работать у себя и для своих. Что и как для этого нужно сделать?

Скажу Вам вкратце, что я делал эти двенадцать лет и что я хотел бы делать:

1. Я занимался (не очень долго) магнитометрией, гравиметрией и электрическими методами геологической разведки (есть ряд печатных мемуаров).

2. Я составил для Institut H.Poincaré весьма обширную библиографию по теории вероятностей с приложениями.

3. Я очень много занимался вопросами биологии в математическом аспекте (напечатано много мемуаров и три книги, из коих одна «Biologie mathématique» переведена на английский язык).

4. Я занимался очень много вопросами геологии, тоже в ма-

тематическом аспекте, но пока напечатал очень мало; подготавливаю книгу.

5. Я занимался разными проблемами дифференциальных и интегральных уравнений (напечатал книгу и ряд мемуаров).

*К этому прибавлю несколько слов о работе моей жены**.*

1. Она в течение ряда лет работала в качестве зоолога в зоологической и сравнительно-анатомической лабораториях Сорбонны, где вела техническую и научную работу (напечатала ряд мемуаров) и также практические занятия со студентами.

*2. В течение ряда лет она работала паразитологом в соотв[етствующей] лаборатории*** — Фасе (у проф. Врумф).*

3. Прodelала статьи по бактериологии в Пастеровском институте у покойного проф. Вейнберга.

4. Принимает участие в гидробиологическом исследовании реки Сены.

5. Резюмировала советские зоологические работы для «Année biologique».

Таким образом, оба мы приедем не с пустыми руками и можем весьма пригодиться. <...>

Шлю Вам самый сердечный привет В.Костицын.

На письме резолюция О.Ю. Шмидта: «Автор письма, проф. Костицын, в свое время обманул Советскую власть и, воспользовавшись командировкой, сбежал. Не вижу в нем надобности для СССР. Оставить письмо без ответа. О.Шмидт 27 января 1941».

Архив РАН. Ф.2. Оп.1а (1941). Д.238. Л.9—10.

С.М.С.

** Юлия Ивановна Гринберг (1899—1950).

*** В документе начало названия лаборатории пробито дыроколом.

Розы в южном небе

Д.З.Вибе,
кандидат физико-математических наук
Москва

Туманность N 44 в Большом Магеллановом облаке — замечательный пример гигантской области ионизованного водорода, имеющей поперечник в 1000 св. лет. Основу местной звездной ассоциации составляет кольцо из 40 очень ярких голубоватых звезд. Каждая из них — источник мощного звездного ветра, который разметает окружающий газ, сгребает его в волокна и выдувает гигантские межзвездные пузыри. Массивные звезды, населяющие туманность N 44, заканчивают свою жизнь грандиозным взрывом — вспышкой сверхновой. Вполне вероятно, что за последние несколько миллионов лет сверхновые в N 44 уже взрывались, еще более усложнив строение туманности. Небольшие полости, волокна, яркие сгустки и другие структуры свидетельствуют о чрезвычайно сложных динамических процессах в этой области.

Представленное изображение получено группой европейских астрономов в 1999 г. на 8.2-метровом телескопе Европейской южной обсерватории при помощи уникальной научной цифровой камеры на 67 мегапикселей [1]. Цвета здесь условны: они передают интенсивность трех важнейших эмиссионных спектральных линий, типичных для областей ионизованного водорода. Голубой цвет соответствует излучению однократно ионизованных атомов кислорода (O II), зеленый — излучению дважды ионизованных атомов кислорода (O III), а красный — излучению бальмеровской линии водорода H α . Иными слова-



Центральный район туманности N 44 в Большом Магеллановом облаке.
ESO PR Photo 31b/03

ми, красный цвет отражает чрезвычайно сложное распределение ионизованного водорода внутри туманности, а голубой и зеленый показывают области различных температур: чем горячее газ, тем больше дважды ионизованного кислорода он содержит и, соответственно, имеет более интенсивный зеленый цвет.

Составная фотография, полученная таким образом, близка к реальным цветам туманности. Основная ее часть окрашена в розоватый тон (смесь голубого и красного), так как в температурных условиях, характерных

для большей части туманности, линии H α и однократно ионизованного кислорода преобладают над линией O III. Однако некоторые области выделяются более яркой зеленой окраской. Каждая из них содержит по крайней мере одну чрезвычайно горячую звезду с температурой от 30 до 70 тыс. градусов. Ее сильное ультрафиолетовое излучение нагревает окружающий газ до более высокой температуры, из-за чего многие атомы кислорода ионизируются вторично, и излучение зеленого цвета становится интенсивней. ■

Литература

1. <http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2003/phot-31-03.html>; см. также: По-настоящему горячие звезды // Природа. 2003. №12. С.71—72.

Звезда, пожирающая свои планеты

Научные сообщения

В январе 2002 г. астрономический мир внимательно наблюдал, как звезда V838 в созвездии Единорога (лат. — Monoceros) внезапно увеличила светимость сразу на 6 звездных величин, что с космическими объектами происходит нечасто. Затем она постепенно начала тускнеть. Однако в феврале и марте краткие, но очень сильные ее вспышки повторились, еще больше запутав ситуацию.

Изучая ход этих событий, астрономы Реттер и Маром (Retter, Marom) высказали гипотезу: звезда V838 Единорога в то время «проглотила» три обращавшиеся вокруг нее планеты. Масса каждой из них была близка к массе Юпитера, а сами они находились примерно в 0,5 а.е. от звезды, образуя весьма компактную планетную систему.

Когда звезда V838 Единорога на склоне лет стала превращаться в красный гигант, ее расширявшаяся оболочка захватила ближайшую к ней планету. Выделившаяся при торможении планеты энергия нагрела атмосферу звезды, что и привело к резкому увеличению ее радиуса и светимости. Когда процесс «пошел», вторая и третья планеты стали для звезды легкой добычей.

Фото новоподобной переменной звезды V838 Единорога (где она окружена красным «туманом») было получено 8 февраля 2004 г. Космическим телескопом «Хаббл». Звезда удалена от нас примерно на 20 тыс. св. лет. После того как в январе 2002 г. астрономы зафиксировали ее мощную вспышку, вокруг звезды стала стремительно расширяться туманность. В действительности туманность со-



Этапы расширения «светового эха» вокруг звезды V838 Моп.

Фото НАСА США

стоит из газовой-пылевой оболочки, уже давно потерянной звездой, но до сих пор оставшегося невидимым. Благодаря вспышке вещество оказалось освещенным, и сейчас туманность демонстрирует нам эффект «светового эха»: расширяясь со скоростью света, вспышка освещает все более и более далекие области туманности, и мы видим ее свет, рассеянный пылью.

Любопытно, что хотя вспышка была замечена немногим более двух лет назад, наблюдае-

мый сейчас радиус оболочки составляет около 5 св. лет. Этот кажущийся эффект сверхсветовой скорости расширения имеет чисто геометрическую причину: вещество, освещенное вспышкой по пути от звезды к Земле, мы формально относим на расстояние звезды, отчего и получаем при вычислении скорость расширения, превышающую скорость света. ■

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2003. 09. P.341 (Великобритания); Science. 2003. V.302. №5643. P.200 (США).

Новости науки

Космические исследования. Техника

К Луне — с новым «мотором»

27 сентября 2003 г. с космодрома Куру в Гвиане (Южная Америка) в космос ушел «Smart-1», подготовленный специалистами Европейского космического агентства. Запущенный ракетой «Arian-5», этот 367-килограммовый аппарат оснащен двигателем на ионной тяге. На его боковой поверхности площадью всего в 1 м² установлены 14-метровые панели; они улавливают солнечную энергию, которая используется для ионизации атомов ксенона (запасенного на борту в количестве 82 кг) и ускорения образовавшихся ионов. Вырываясь в открытое пространство, ионизованный газ придает аппарату тягу силой 70 мН. Это незначительная величина, но поскольку она прилагается длительное время в космическом вакууме и сохраняется до тех пор, пока на солнечные элементы падает свет, скорость аппарата медленно, но неуклонно возрастает.

Подобный ионный двигатель уже применялся для поддержания спутников на заданной околоземной орбите. Единственный раз его использовали и в качестве основного двигателя при запуске в 1998 г. американского аппарата «Deep Space-1», рассчитанного на дальние полеты. Теперь и Европейское космическое агентство применило ионную тягу, так как она создает вдесятеро больший импульс на единицу массы горючего, чем обычное химическое топливо. Этот эксперимент агентства — часть далеко идущих его планов по изучению всей Солнеч-

ной системы — от Меркурия до пояса Койпера. Аналогичный аппарат к Меркурию предполагается запустить в 2011—2012 гг.

Сейчас «Smart-1» находится на сравнительно низкой околоземной орбите. Обращаясь по расширяющейся спирали, он постепенно достигнет высоты 200 тыс. км над Землей; уже здесь он в полной мере ощутит притяжение Луны, а в марте 2005 г. будет захвачен ею. Тогда, с помощью приборов, установленных на «Smart-1» (миниатюрной телекамеры, инфракрасного спектрометра и спектрометра, способного строить изображения объекта), и начнется реализация программы, нацеленной на решение проблемы происхождения нашего естественного спутника.

Инфракрасные карты Луны составлялись и ранее (например, приборами американского аппарата «Clementine»). «Smart-1» выполнит подробную съемку в тепловых лучах тех районов, которые вызывают наибольший интерес специалистов. Прибор охватывает 250 диапазонов частот, тогда как «Clementine» было доступно лишь пять.

В глубоких кратерах у южного полюса Луны будет осуществлен поиск излучений, характерных для воды и льда. Прямой солнечный свет туда не проникает, однако прибор в состоянии воспользоваться светом, отраженным от склонов кратера и преломляющимся ледяной коркой. Подобный эффект скорее всего будет очень слабым, но полгода пребывания на окололунной орбите позволит благодаря многократным наблюдениям получить ценную информацию о присутствии водного льда на этом небесном теле.

Сейчас наиболее распространена следующая гипотеза возник-

новения Луны: около 4.5 млрд лет назад Протоземля столкнулась с неким крупным небесным телом; затем выброшенные в космос обломки постепенно соединились, пока у Земли не образовался ее естественный спутник.

Образцы лунных пород, доставленные астронавтами экспедиций «Apollo», говорят о том, что на Луне есть вещества, встречаемые в мантии Земли. Но малое число образцов и ограниченность районов, откуда они взяты, не позволяют делать решительные выводы о составе всей Луны. Солнечное рентгеновское излучение, попадая на лунную поверхность, вызывает в ее атомах флуоресценцию. Фотоны с характерными для каждого элемента длинами волн будут улавливать рентгеновский спектрометр аппарата «Smart-1».

Разработка бортовой инфракрасной аппаратуры осуществлялась специалистами во главе с С.Данкин (S.Dunkin; Лаборатория им.Резерфорда и Эпплтона в Чилтоне, Великобритания). Эксперименты в области рентгеновского излучения организованы сотрудниками той же лаборатории под руководством М.Гранде (M.Grande). Общее руководство миссией осуществляет итальянский ученый Дж.Ракка (G.Racca). Science. 2003. V.302. №5642. P.35 (США).

Космические исследования

Продлена миссия «Улисса»

В феврале 2004 г. Комитет по научной программе Европейского космического агентства (ESA) одобрил решение о продлении финансирования космического аппарата «Улисс» до марта 2008 г.

Это, уже третье, продление в истории совместного с НАСА проекта позволит «Улиссу» продолжить сбор важной информации о высокоширотной гелиосфере. В 2007—2008 гг. зонд в третий раз пролетит над полюсами Солнца. В отличие от последней встречи «Улисса» с Солнцем в 2000—2001 гг., пришедшейся на максимум солнечной активности, условия третьего пролета ожидаются более спокойными — какими они были в 1994—1995 гг., когда «Улисс» впервые посетил эти области гелиосферы. Однако предвидится и важное отличие.

Хотя солнечная активность следует хорошо известному 11-летнему циклу, состояние гелиосферы управляется 22-летним магнитным циклом. Поскольку во время недавнего солнечного максимума северный и южный магнитные полюса Солнца поменялись местами, магнитная полярность Солнца в 2007—2008 гг., отмечает Р.Марсен (R.Marsden; ESA), будет противоположна полярности его предыдущего минимума. Магнитное поле Солнца определяет траектории, по которым движутся сквозь гелиосферу заряженные частицы — космические лучи, солнечный ветер и даже межзвездные пылинки. «Улиссу» предстоит установить, есть ли какие-либо отличия в их поведении, вызванные сменой магнитной полярности.

Изучение окрестностей Солнечной системы с помощью «Улисса» оказалось удивительно плодотворным. Хотя главной целью было и остается изучение полярных областей Солнца, инструменты космического аппарата способны определять свойства отдельных атомов и пылинок, пролетающих сквозь гелиосферу. Многие важные измерения можно провести только тогда, когда «Улисс» находится на максимальном удалении от Солнца. Период с 2004 по 2006 г. предоставляет уникальную возможность расширить эти исследования.

Press Release ESA. 12 February 2004;
<http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=3464>

Космические исследования

Будущее космического телескопа «Хаббл»

Уже четырнадцатый год на околоземной орбите работает уникальный космический телескоп «Хаббл», благодаря которому получены ценные наблюдения, приведшие к открытиям в астрофизике, астрономии и геофизике. В марте 2002 г. аппарат в четвертый раз посетили американские астронавты с тем, чтобы провести очередной его осмотр и ремонт, а также установить новые научные приборы. Однако срок активной жизни «Хаббла» неумолимо близится к концу. В связи с этим НАСА США поручило независимой комиссии во главе с астрофизиком Дж.Бакколлом (J.Bahcall; Институт перспективных исследований в Принстоне) выработать рекомендации относительно будущей судьбы этого космического телескопа.

НАСА запланировало лишь одно посещение «Хаббла» астронавтами, намеченное на 2005 или 2006 г., после чего в течение нескольких лет он должен под контролем быть сведен с орбиты и упасть на Землю. Однако авторитетная комиссия считает потерю телескопа нецелесообразной, поскольку инструмент мог бы еще не один год приносить пользу науке, для чего необходимо в ближайшие семь лет направить к нему две ремонтно-обновляющие экспедиции, способные выйти на соответствующую орбиту с помощью космических челноков. С.Бекуит (S.Beckwith) — директор Института космического телескопа (Балтимор, штат Мэриленд), специально созданного для работы с «Хабблом», отмечает, что продление срока жизни аппарата позволит сочетать его работу с новым космическим телескопом «Джеймс Уэбб»¹, который предстоит запустить в 2011 г. Телескоп «Джеймс Уэбб» будет иметь на борту 6-метровое зеркало и высокочувствительные приборы, способные регистрировать даже слабые источ-

¹ Космический телескоп им.Джеймса Уэбба // Природа. 2004. №5. С.82.

ники ИК-излучения, которое недоступно аппаратуре «Хаббла», работающей в близком инфракрасном диапазоне. Особенно важно, что одни и те же объекты будут изучаться одновременно в разных диапазонах излучения. Член комиссии, лауреат Нобелевской премии по физике Ч.Таунс (Ch.Townes) подчеркивает необходимость получения непрерывного ряда наблюдений, без чего надежные однозначные выводы невозможны.

В итоге комиссия пришла к единогласному заключению: в 2010 г. следует провести шестое посещение «Хаббла» для возможного ремонта и замены некоторых частей его аппаратуры. Это потребует 300—600 млн долл. на саму миссию посещения и еще не менее 600 млн на обслуживание аппарата и его навигационных приборов. Однако ученые настроены оптимистично, учитывая, что «Хаббл», первоначально обошедшийся налогоплательщикам в 1.5 млрд долл., еще не исчерпал своих возможностей.

Science. 2003. V.301. №5636. P.1029 (США); www.nasa.gov/pdf/49151main_hst-jwst.pdf

Планетология

На Нептун пришло лето

Астрономы и астрофизики из Университета штата Висконсин в Мэдисоне и Лаборатории реактивного движения НАСА США в Пасадене завершили под руководством Л.Стромовски (L.Stromovsky) обработку большого массива данных по наблюдению Нептуна, которые были проведены ими в 1996, 1998 и 2002 гг. и осуществлялись с помощью Космического телескопа «Хаббл».

Как выяснилось с начала изучения этой восьмой от Солнца планеты, в ее Южном полушарии неуклонно идет значительное потепление. Оно проявляется в росте количества облаков, что связано с увеличением тепловой энергии, поступающей от Солнца. Облачные полосы в атмосфере планеты становятся шире и ярче, несомненно свидетельствуя о на-

ступлении «лета» в Южном полушарии Нептуна.

Нептун известен своей неукротимой погодой. Там постоянны мощные штормовые системы, скорость ветра в которых достигает 1400 км/ч. Но факт смены времен года на Нептуне наблюдателями зарегистрирован впервые, хотя в 1980 г. на него предположительно указывал астроном Дж.У.Локвуд (G.W.Lockwood; Ловелловская обсерватория, США).

Ось вращения Нептуна наклонена на 28° по отношению к плоскости его орбиты (у Земли — на 23.4°). В результате солнечное излучение, поступающее к планете, варьируется в ходе нептунианского года, продолжающегося 164.5 земных лет, порождая своеобразные «сезоны». Однако они выражены в 900 раз слабее, чем на Земле, вследствие значительного удаления планеты от Солнца.

Spaceflight. 2003. V.45. №7. P.269 (Великобритания).

Геофизика

Полярные сияния: взгляд изнутри

Сотрудники Геофизического института при Университете штата Аляска в Фэрбенксе провели в 2003 г. ряд экспериментов по изучению полярных сияний и связанных с ними геомагнитных и метеорологических явлений в верхних слоях атмосферы. Эти работы — часть серии экспериментов HIBAR (High Bandwidth Auroral Rocket — Авроральная ракета широкого диапазона).

На полигоне Покер-Флатс в Приполярье запускались на высоту около 385 км ракеты типа «Terrier-Black Brant» с измерительной аппаратурой на борту. Проникая сквозь полярное сияние, приборы регистрировали процессы турбулентности и связанные с ними высокочастотные волны.

На том же полигоне проводилась серия экспериментов по измерению частиц высоких энергий. Верхний конец одной из запущенных ракет совершал в полете значительные отклонения от

вертикали, чтобы приборы могли вести измерения внутри дуги полярного сияния; третья ступень этой ракеты в разреженных слоях атмосферы переставала испытывать торможение и некоторое время двигалась в пространстве горизонтально. Спустя 19 мин после первого запуска отправлялась по обычной, вертикальной траектории ракета типа «Terrier-Orion». Сопоставление данных, полученных от обеих ракет, позволило более детально охарактеризовать геомагнитную обстановку в ближайших окрестностях Земли.

Каждая из ракет выбросила в верхней атмосфере порцию триметил-алюминия — образовавшийся белый сверкающий хвост фиксировали и фотографировали выносные наблюдательные станции, расположенные на территории Аляски и Канады, благодаря чему с высокой точностью были определены направление и сила ветров в высоких слоях воздушного пространства.

На следующем этапе экспериментов в течение 5 мин были запущены четыре ракеты для непосредственных измерений силы и направления ветра; на двух из них приборы определяли в области полярного сияния интенсивность свечения заряженных частиц и мелкомасштабные электрические токи. Длинный хвост, образованный выброшенными веществами, тоже фотографировался камерами выносных станций.

Результаты проведенных экспериментов обрабатываются в Геофизическом институте Фэрбенкса. Geophysical Institute Quarterly. 2003. V.18. №3. P.2 (США).

Электроника

Яркие электронные эмиттеры на углеродных нанотрубках

Источники электронов на основе углеродных нанотрубок уже сейчас составляют заметную конкуренцию традиционным металлическим и полупроводниковым устройствам благодаря хорошей проводимости, а также высокому

аспектному отношению, обеспечивающему значительное усиление электрического поля. Эмиттеры, используемые в электронных микроскопах, должны характеризоваться не только большой плотностью тока эмиссии, но и (для достижения лучшего разрешения) высокой яркостью (определяемой как величина электронного тока, который может быть сфокусирован с данного телесного угла в пятно данного размера).

Специалисты компании «Philips Research Laboratories» (Голландия) детально исследовали яркость источников электронного пучка на индивидуальных многослойных нанотрубках диаметром менее 10 нм и длиной от 0.2 до 1 мкм, полученных стандартным электродуговым методом. Трубку монтировали на вольфрамовом острие зонда сканирующего электронного микроскопа, а на расстоянии нескольких миллиметров от нее располагали анод — тонкую углеродную пленку с отверстием диаметром 10 нм, необходимым для пролета электронов. Яркость эмиттера определяли по размеру пятна, которое электронный пучок создавал на экране, находящемся в нескольких сантиметрах от пленки. Измерения проводили при различных расстояниях между эмиттером и пленкой, а также между пленкой и экраном.

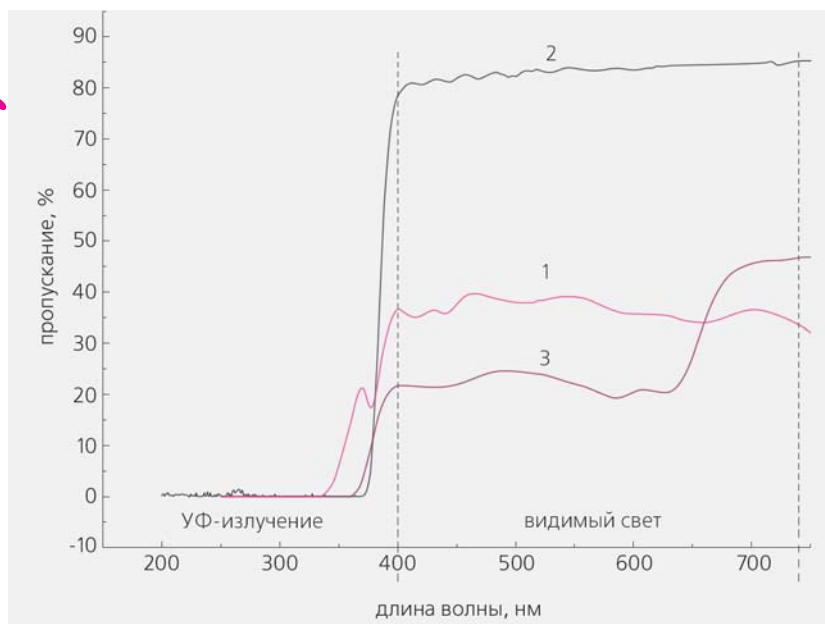
Подавая напряжение в несколько сотен вольт, исследователи получали у трубок ток эмиссии ~1 мкА, а яркость ~10⁹ А/м²·В·ср — примерно на порядок выше, чем у эмиттеров Шоттки и вольфрамовых холодных полевых эмиттеров, которые считаются лучшими в своем классе.

http://perst.issph.kiae.ru/inform/perst/4_01/index.htm

Химия полимеров. Медицина

Менять ли стеклянные очки на пластиковые?

Мода на пластиковые солнцезащитные очки появилась лет 40 назад, и тогда же у специалистов возникли сомнения в их безопас-



Спектры пропускания линз: стеклянной с нейтральным фильтром (1), прозрачной пластиковой (2) и пластиковой с напылением, снижающим пропускание (3)

ности: такие очки, в отличие от обычных стеклянных, не задерживали лучи из ближней ультрафиолетовой области. Человеческий же глаз чувствителен лишь к видимому свету, и зрачок расширяется или сужается в зависимости от интенсивности излучения именно в этой части спектра. Пластиковые очки «обманывали» глаз: снижая поток видимого света, они заставляли зрачок расширяться, а сетчатка при этом получала избыточную порцию ультрафиолета.

С тех пор технология полимеров ушла далеко вперед, и сейчас пластиковые линзы успешно конкурируют со стеклянными. А как обстоит дело с проблемой ультрафиолетового облучения?

Известно, что вещество поглощает электромагнитное излучение, если энергия падающих квантов соответствует энергии переходов между различными уровнями состояний. В твердом теле так называемое фундаментальное поглощение имеет место при переходе электронов из валентной зоны в зону проводимости. В стекле запрещенная зона, разделяющая эти области, отвечает длине волны вблизи фиолетовой границы видимой части

спектра. Величину запрещенной зоны можно изменять, варьируя состав и структуру вещества. Насколько успешно удалось приблизить по оптическим характеристикам пластик к стеклу, демонстрирует рисунок: у современной пластиковой линзы край поглощения расположен еще ближе к полосе видимого света, чем у стеклянной. Иными словами, химики-технологи научились получать полимерные материалы, не уступающие стеклу по своим защитным свойствам.

© **Исаков Д.В.**,
кандидат физико-математических наук
Институт кристаллографии
им.А.В.Шубникова РАН
Москва

Охрана природы

Перепись бенгальского тигра

Вдоль границы Индии с Бангладеш на 10 тыс. км протянулась гигантская область мангровых зарослей Сундарбан. Человека здесь встретить — большая редкость. Зато непроходимые чащи и марши (полосы низменных побережий

моря) — привычное место обитания королевских бенгальских тигров (*Panthera tigris*), которых на всем земном шаре осталось, вероятно, около 600 особей.

Однако ни точная численность этого красивого и грозного зверя, ни его способность выживать и давать потомство, ни его поведение доподлинно не известны. Поэтому власти Индии и Бангладеш пришли к редкому для них согласию — провести совместную операцию под названием «Перепись тигров».

Так как встреча с тигром «лицом к лицу» чрезвычайно опасна (сундарбанские тигры убивают в среднем около 10 человек в год), зоологи и экологи предпочитают знакомиться с ним по оставленным следам. Специалисты умеют по гипсовому слепку отпечатка лап определять возраст, массу и пол зверя. Некоторые биологи полагают, что такая перепись будет недостаточно полной, и лучше бы установить на тигриных тропах автоматически действующие фотокамеры. Но многоопытные индийские ученые отрицают этот способ: в условиях очень влажной местности современная техника ненадежна. Все же нескольких тигров решено было временно обездвигнуть, выстрелив шприцем со снотворным, и снабдить ошейником с миниатюрным радиопередатчиком. Это позволит следить за перемещениями зверей.

К участию в переписи привлечено 460 биологов и лесников из обеих стран. Операцию финансирует Программа Развития при ООН (ПРООН), одно из направлений которой — сохранение биоразнообразия и защита окружающей среды.

Science. 2004. V.303. №5658. P.621 (США).

Экология

Жизнь в озерах поддерживают наземные экосистемы

Гидробиологи давно предполагали, что жизнь в озерах и водохранилищах не может быть целиком обеспечена тем количеством

углерода, которое связывается фитопланктоном в ходе фотосинтеза. Величина суммарного дыхания всех обитателей водной толщи нередко превышает величину первичной продукции, образуемой автотрофными организмами, прежде всего микроскопическими планктонными водорослями и цианобактериями. Это значит, что в экосистеме разлагается органического вещества больше, чем образуется. Следовательно, чтобы могли существовать гетеротрофные организмы (бактерии, простейшие и животные), которые как раз и разлагают органическое вещество, оно должно поступать с суши во взвешенном и растворенном состоянии и каким-то образом включаться в пищевые цепи.

Соотношения суммарного дыхания и суммарного фотосинтеза были получены, в частности, отечественными гидробиологами (Ю.И.Сорокиным и др.) еще в 1970-х годах¹. Принципиально новый шаг в изучении динамики углерода в водных экосистемах сделали недавно М.Пейс из Института экосистемных исследований в Милбруке (США) и его коллеги из нескольких научных учреждений США и Швеции². Объектами экспериментов были два небольших, но довольно глубоких озера в штате Мичиган (площадь 1.2 и 1.4 га, максимальная глубина соответственно 12.2 и 19 м). В летние месяцы с движущейся лодки непосредственно в верхний слой водной толщи в течение 42 дней закачивали раствор $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$. Поскольку бикарбонат натрия содержал изотоп ^{13}C , его дальнейшую судьбу можно было проследить. За время экспериментов уровень ^{13}C заметно вырос как в озерной воде (в виде растворенного неорганического углерода), так и во взвешенном органическом веществе (сюда входят фито- и зоопланктон, бактерии, простейшие, частицы детрита). Очевидно, что $^{13}\text{CO}_2$ быстро

связывался фитопланктоном и включался в пищевые цепи. В частности, стабильный изотоп появился и в телах дафний, доминирующих планктонных животных, которые питаются фитопланктоном, а их самих потребляют хищники — молодь рыб.

Исследователи построили три модели динамики углерода в озерной экосистеме. В первой из них подразумевалось, что весь неорганический углерод верхнего слоя водной толщи фиксируется в процессе фотосинтеза, а затем переходит в тела дафний и во взвешенное органическое вещество. Какого-либо другого источника органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$), помимо фотосинтеза в водоеме, эта модель не учитывала. Во второй предусматривалось, что $\text{C}_{\text{орг}}$ не только образуется за счет фотосинтеза планктона, но и привносится с суши (содержание изотопа ^{13}C , характерное для наземной растительности в районе озер, было известно). Третья модель представляла собой усложненный вариант второй: дополнительно учитывался еще и тот углерод, который был включен фитопланктоном некоторое время назад, а позднее вошел в пищевые цепи (с задержкой на 6 и 10 дней в разных вариантах модели). Сопоставив все три модели с имеющимися эмпирическими оценками, исследователи обнаружили, что с результатами экспериментов лучше всего совпадает третья модель, а хуже — первая, не принимавшая во внимание внешний источник $\text{C}_{\text{орг}}$.

Согласно расчетам, в исследованных озерах 40—50% углерода, содержащегося во взвешенном органическом веществе, образовалось на суше, а не в воде. В зоопланктоне доля «наземного» $\text{C}_{\text{орг}}$ достигает 22—50%. Авторы подчеркивают: их выводы относятся к небольшим озерам, площадью 1—2 га. Не исключено, что в более крупных водоемах его доля будет не столь значительной. Кроме того, не ясно, каким образом органическое вещество включается в пищевые цепи — ведь в основном оно представляет собой соединения, устойчивые к разложе-

нию бактериями. В связи с этим особенно интересна недавно опубликованная работа немецких исследователей, которые показали, что в речной воде, освобожденной от всех живых организмов, около 25% растворенного $\text{C}_{\text{орг}}$ переходит в дисперсную форму³. В результате образуются структуры, напоминающие мицелий, с диаметром «нитей» 0.4—0.8 мкм, причем происходит это исключительно за счет физико-химических процессов, без участия организмов. Подобные скопления органического вещества могут не только служить субстратом для бактерий, но и непосредственно потребляться животными, которые питаются бактериями и детритом.

© Гиляров А.М.,
доктор биологических наук
Москва

Экология

Вирус против жаб

Ученые и общественность прилагают массу усилий, чтобы сохранить стремительно исчезающих на Земле земноводных и пресмыкающихся. Но в то же время изобретаются новые, изощренные способы борьбы с некоторыми видами животных! Речь идет, в частности, о тех, которые когда-то случайно или преднамеренно были вывезены за пределы своего ареала и, успешно там освоившись, создали реальную угрозу естественным природным экосистемам.

Один из ярких примеров — жаба-ага (*Bufo marinus*). Эту крупную — до 25 см длиной! — южноамериканскую жабу отличает живучесть, плодовитость и хороший аппетит. Она поедает все, что движется и может быть проглочено. А это не только всевозможные беспозвоночные, но и мелкие позвоночные животные, в том числе другие земноводные.

Когда-то жабу-агу начали расселять как эффективную защитницу сельскохозяйственных насаждений. Но в итоге прожорливая ³ Kerner M., Hobenberg H., Ertl S. et al. // Nature. 2003. V.422. P.150—154.

¹ См. также: Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб., 2000.

² Pace ML, Cole JJ, Carpenter SR. et al. // Nature. 2004. V.427. P.240—243

хищница обосновалась в различных уголках планеты и стала теснить местных обитателей. Надо отметить, что вселившаяся ага представляет опасность не только для местных земноводных, но и для более крупных животных. Одна из самых ядовитых земноводных, она далеко не безопасна и для человека. Секретами, выделяемыми ее кожей, индейцы смазывали наконечники стрел. Случайно схвативший агу хищник, например собака, погибает в муках.

Особенно страдает от иноземного вторженца Австралия. Неудивительно, что именно здесь разработана необычная методика борьбы с жабой-агой¹. Группа специалистов во главе с Т.Робинсоном (T.Robinson; Австралийское агентство CSIRO — Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) в ходе проведенных исследований выделила вирус, нарушающий метаморфоз личинок жабы. Внедренный в возникшие популяции вирус быстро в них распространяется, практически прекращая воспроизводство этих амфибий. Для других же видов земноводных он совершенно безопасен.

Ученые надеются, что применение нового метода позволит существенно сократить численность жабы-аги в Австралии. Для начального, двухлетнего этапа исследований федеральное правительство Австралии уже выделило 1 млн долл.

© Семенов Д.В.,

кандидат биологических наук
Москва

Вулканология

Паго взят под надзор

На северо-востоке Папуа—Новой Гвинеи находится архипелаг Бисмарка, образованный островами вулканического происхождения. На крупнейшем из них — о.Новая Британия — расположен вулкан Паго². Его 250-метровый конус возник внутри древнего кратера Витори, появившегося,

¹ Herp-Digest. 2003. V.3. №35.

² Вулкан Паго пробудился // Природа. 2003. №8. С.86—87.

по геологическим данным, не менее 3 тыс. лет назад в результате мощного взрыва, по силе близкого к катастрофе Кракатау³ 1883 г. Сравнительно молодой вулкан, выросший на плоскодонной кальдере Витори, время от времени дает о себе знать и в наше время.

С 1911 по 1918 г. Паго извергался довольно бурно; выброшенный им пепел покрыл окрестные поля, комья шлака заметно увеличили высоту центральной горки, а выплески дацитовых лав еще целое десятилетие источали жар. Между 1928 и 1933 гг. он снова проявлял активность, но слабую, ограничиваясь главным образом струями дыма и пара.

«Проспав» почти 70 лет, Паго внезапно взорвался 5 августа 2002 г. Может, какие-то признаки пробуждения он и подавал, но не очень заметные для людей, тем более что на склонах и вершине не было ни сейсмографов, ни наклономеров, которые бы это зафиксировали. По случайному совпадению за несколько часов до взрыва в ближайшую Вулканологическую обсерваторию Рабаула прибыл сейсмолог Т.Далзил (T.Dalziel; австралийское Управление наук о Земле в Канберре) — он должен был установить на горе небольшой сейсмограф, включив его в национальную телеметрическую сеть Папуа—Новой Гвинеи (сеть начали создавать в 1994 г., после сильного землетрясения и извержения рядом с Рабаулом). Однако с установкой прибора опоздали: к этому моменту тысячи людей, опасаясь гибели, уже бежали из окрестных деревень. Юго-восточный пассат отнес тяжелые тучи, насыщенные вулканическим пеплом, в сторону главного аэропорта Новой Британии, и его пришлось закрыть; по всей окрестности покрылись пеплом маслячные пальмы, играющие немалую роль в местной экономике.

Вскоре на о.Новая Британия прибыли из США, Японии и Австралии сейсмологи, вулканологи и специалисты по чрезвычайным ситуациям. Несмотря на опас-

³ Кракатау вновь напоминает о себе // Природа. 2000. №1. С.72—73.

ность, они установили невдалеке от конуса Паго новые сейсмографы и оборудование для связи со спутником GPS. С других спутников провели съемку района в инфракрасной полосе спектра. Обработка получаемых данных показывает, что нынешнее извержение похоже на случившиеся здесь в 1911—1918 гг.: лава может выплескиваться из кратера в течение ряда лет. Сейчас она изливается из расселины на северо-восточном склоне горы; длина раскаленного потока в 2003 г. превысила 2 км, но, достигнув небольшого хребта, он остановился, образовав все пополнившееся раскаленное озеро. Жителям, которые понемногу возвращались в деревни, вулканологи сообщили, что опасности новых взрывов, подобных первоначальному, 2002 г., нет.

AusGeoNews. 2003. №70. P.20 (Австралия).

Сейсмология. Гляциология

Гляциогенные землетрясения

Гляциологи, предгорники, а кое-где и жители предгорий становятся свидетелями весьма быстрых подвижек льда. Установлено, что переход от пассивного состояния к динамическому может иметь различные временные масштабы — от столетия до десятилетия или даже менее — в зависимости от природных факторов. В Гренландии и Антарктиде, например, иногда происходит стремительная разгрузка континентальных масс через так называемые выводные ледники.

Динамически неустойчивые, пульсирующие ледники могут возбуждаться с интервалами в сотни, десятки лет, а иногда всего за недели или сутки. С таким непостоянством связано явление, до сих пор особо не привлекавшее внимание специалистов. Это — землетрясения, которые вызываются не тектоническими, вулканическими или иными хорошо знакомыми геофизическими факторами, а изменениями ледниковых ситуаций.

Сейсмологи М.Неттлс Г.Экстрём, (M.Nettles, G.Ekström; Гарвардский университет в Кембрид-

же) и Дж.А.Аберс (J.A.Abers; Бостонский университет), проводя исследования в Гренландии, зарегистрировали достаточно сильные подземные толчки, явно связанные с массовым сбросом льда по склону гор. Прежние редкие наблюдения позволяли замечать лишь незначительные события, которые длились не более нескольких секунд и охватывали всего метровую длину ледника. Обычно такие явления характерны для мест, где лед, встречая на своем пути некое препятствие, преодолевает его рывком. Теперь же зафиксированы намного более крупные события, в которых участвуют большие массы льда и протяженные участки его каменистого ложа. Возможно, это результат кратковременного разрыва в контакте льда с подстилающей горной породой.

Длиннопериодный сейсмический сигнал, порождаемый пульсирующим движением льда и продолжающийся почти целую минуту (т.е. в 15–30 раз дольше обычного тектонического землетрясения), указывает, что слой льда подвергся внезапному мощному ускорению. Некоторые эпизоды быстрого стекания чередуются с почти полным покоем. Ныне зафиксировано, что десятки кубических километров льда могут сместиться на метры менее чем за минуту.

У крупных ледников краткосрочные колебания в скорости движения обычно происходят в ответ на внешнее воздействие, например на поступление больших масс талой воды или же как реакция на приливно-отливное колебание уровня океана.

Экстрём построил карту-схему «ледниковой сейсмичности» на юге Гренландии. На ней обозначены места, где происходили землетрясения, ранее не зафиксированные никакими сейсмическими центрами, а ныне там отмечено 521 землетрясение. Правда, около 450 из них имеют тектоническое происхождение (связанное с активностью северного отрезка Срединно-Атлантического подводного хребта), но другие явно вызваны гляциологическими явлениями. Высокая частота возбужден-

ных ими сейсмических волн была прежде недоступна для регистрации традиционными методами.

Все три области в Гренландии, где исследователи обнаружили связанную с ледниками сильную сейсмичность, расположены в районах крупных выводящих ледников, на которых сейчас наблюдается значительное поверхностное таяние. Лазерное зондирование с самолета-лаборатории показало, что нижние (концевые) части ледников быстро сокращаются из-за снижения объема зимних осадков, усиления летнего таяния и, вероятно, ускорения стока в море. Талые воды, поступающие под ледник, образуют своего рода смазку, которая ускоряет движение льда вниз по склону.

Данные выводы подтверждаются результатами изучения землетрясения, случившегося 4 сентября 1999 г. в районе горы Мак-Кинли (штат Аляска). Сейсмостанция, расположенная в 200 км от эпицентра, отметила, кроме обычных короткопериодных колебаний, наличие длинопериодных (десятьки секунд) поверхностных волн, связанных с резким движением близлежащего ледника Дали. Причиной могло стать смещение примерно 10 км³ льда на расстояние до 13 м всего за какие-нибудь 26 с.

Таким образом, открыт класс гляциоогенных землетрясений. Их изучение будет проводиться также в условиях Антарктического оледенения; привлечение спутников GPS позволит с большой точностью определять скорость стекания ледника и потери его массы. Science. 2003. V.302. №5645. P.622 (США).

Гляциология

Динамика таяния льда в арктических морях

Г.И.Белчанский и Н.Г.Платонов (Институт экологии и эволюции им.А.Н.Северцова РАН) вместе с В.С.Дугласом (Аляскинский научный центр, США) установили даты начала таяния, начала замерзания и продолжительность периода таяния льда для арктических морей за 23 года (1979–2001).

Оценка проводилась на основе микроволновых спутниковых изображений и данных о приземной температуре воздуха.

Продолжительность сезона таяния морского льда для всего Северного полушария колебалась в рассматриваемый период от минимального значения — 104 дня в 1983 и 1996 гг. до максимального — 124 дня в 1989 г. Наибольшие амплитуды таких колебаний отмечались для прилегающих к Северному Ледовитому океану морей и составили: для моря Лаптевых — 32 дня, Баренцева и Карского — 42, Восточно-Сибирского — 44, Чукотского — 51 день. В Северном Ледовитом океане средняя продолжительность периода таяния изменялась от минимального значения — 75 дней в 1987 г. до максимального — 103 дня в 1989 г. В среднем таяние временного ледового покрова начиналось на 10.6 дня раньше постоянного, а ледостав отмечался на 18.4 дня раньше образования временного льда. Динамика состояния ледового покрова хорошо коррелирована с зимним индексом Арктических колебаний (АК), который отражает атмосферную циркуляцию в Северном полушарии.

Наиболее значительно продолжительность периода таяния увеличивалась в арктических широтах Восточной Сибири, в области пониженного давления и аномалий перемещения льда, что связано с высокими значениями индекса Арктический колебаний. Так, в 1989 г. среднегодовая продолжительность периода таяния в северной части Восточно-Сибирского и Чукотского морей увеличилась на 2–3 недели.

Полученная за последнее время информация о пространственном распределении замерзания оказалась в большой степени схожей с характером распределения, наблюдавшимся в 1979–1988 гг. Эти данные наводят на мысль о периодичности процессов замерзания, согласующейся с повторяемостью низких значений индекса Арктических колебаний.

Всемирная конференция по изменению климата. Тезисы докладов. М., 2003. С.377 (Россия); e-mail belchans@eimbu.ru

Климатология

Потепление в высоких широтах

Полярные и приполярные регионы Земли отличаются особой чувствительностью к изменениям климата — это те области, где можно отслеживать самые ранние свидетельства глобального потепления.

Данные о динамике температур поверхности Земли по всей Арктике за 1981—2001 гг. были получены американскими климатологами с борта различных метеоспутников в тепловом диапазоне излучения.

Наибольшие аномалии температуры в сторону повышения отмечены над постоянно покрытой плавучими льдами частью Северного Ледовитого океана и континентальными районами Евразии и Северной Америки. Над Гренландией же наблюдалось легкое похолодание, либо всякая температурная динамика отсутствовала.

Зафиксировано, что в 1990-х годах общее потепление шло более интенсивно, чем в 1980-х. Повышение температуры продлило в Арктике сезон таяния льда и снега на 10—17 сут за каждое десятилетие. Эта величина в восемь раз превышает средние темпы роста температур за предыдущее столетие. Предполагается, что такое ускорение темпов потепления в приполярной области Северного полушария может быть связано с недавним изменением фазы Арктической осцилляции или с ростом концентрации парниковых газов в атмосфере Земли.

Journal of Climatology. 2003. V.16. P.3498 (США).

Палеонтология

Немореходные динозавры

Завроподы — огромные четвероногие динозавры с длинной шеей — считались водными существами, которые питаются главным образом водорослями. Одна-

ко палеонтологи установили, что их легкие не могли функционировать при нырянии, и тогда завропод пришлось «переселить» на сушу; полагали, что они бродили по заливным лугам и долинам, ныряя в воду лишь в самом крайнем случае.

На ежегодном собрании Общества палеонтологии позвоночных (Сент-Пол, октябрь 2003 г., США) исследовательница К.Карри-Роджерс (К. Curry-Rogers) сделала доклад, существенно меняющий прежние представления. Построенная ею компьютерная модель убедительно показывала, что при любой попытке ныряния этот динозавр неизменно всплывал бы на поверхность и в таком состоянии терял устойчивость. Даже на мелководье он был бы крайне неустойчив. Одной из причин, почему ученые «погружали» завропод в озера, было стремление объяснить странность их сохранившихся следов: всегда оставались отпечатки лишь передних конечностей. Поэтому считалось, что завроподы передвигались в воде, опираясь на передние конечности, а задняя часть тела находилась на плаву. Однако палеонтолог М.Локби (М. Lockby; Университет штата Колорадо в Денвере) с коллегами предположили, что все же опирались они на четыре ноги, но передние были уже и глубже проседали в донных осадках, а потому их следы лучше сохранялись. С ними не согласен Дж.Уилсон (J. Wilson; Университет штата Мичиган в Анн-Арборе), указавший, что у большинства динозавров центр тяжести расположен ближе к задним, а не к передним ногам. Вместе с коллегой Д.Фишером (D. Fisher) он вычислил величину давления, оказываемого на почву конечностями различных динозавров, смоделированных из пластических материалов. Модели, погруженные в воду, стояли на всех ногах, опираясь на дно, но передние конечности принимали на себя большую нагрузку. В случае с брахиозавром, наполовину погруженным в воду (глубина 2—3 м), давление передних ног на дно было в 20 раз

сильнее, чем задних. Этим, по мнению исследователя, и можно объяснить отсутствие следов задних конечностей.

Интересный эксперимент провел канадский палеонтолог Д.Хендерсон (D. Henderson; Канадский университет в Калгари). Он построил математическую трехмерную модель, учитывающую распределение мускульной и костной ткани и воздушных мешков в теле динозавра, и погрузил его в виртуальную озерную воду. Оказалось, что легкие и относительно пористые кости животного заставляют его тело всплывать подобно гигантской пробке. Так, брахиозавр, помещенный по плечи в воду глубиной 4.7 м, вообще не касался дна задними конечностями, что соответствует ранним представлениям, сложившимся из-за отсутствия их следов.

Другие завроподы — диплодоки и апатозавры — всплывали в воде передними ногами выше, чем задними, и потому следы их передних конечностей единственными быть не могли.

Результаты моделирования говорят, что завроподы, стоя на дне озера на четырех ногах, испытывали бы немалые трудности. Хотя длинная шея и хвост обеспечивали им относительную устойчивость в продольном направлении (от головы к хвосту), животные оказывались под угрозой переверачивания, и первая же волна повалила бы их. По тем же причинам завроподы могли испытывать трудности при плавании.

Science. 2003. V.302. №5645. P.549 (США).

Палеантропология

Очень древняя находка «современного» европейца

В 2002 г. трое румынских спелеологов обнаружили в Трансильванских Альпах неизвестную пещеру, в самой середине которой на полу лежала неплохо сохранившаяся челюсть человека. Она выглядела слишком массивной и тяжелой, чтобы принадлежать нашему современнику. Через археолога

О.Молдован (O.Moldovan; Академия наук Румынии) небольшой кусочек челюсти был передан для изучения известному американскому палеантропологу Э.Тринкаусу (E.Trinkaus).

На совместной конференции Палеантропологического общества и Американской ассоциации физической антропологии (Темп, апрель 2003 г.) Тринкаус сообщил результаты радиоуглеродного датирования образца — челюсти по меньшей мере 35 тыс. лет, а ее строение позволяет с уверенностью говорить о принадлежности не древнейшему неандертальцу, а человеку современного типа.

Находка произвела сенсацию. Считается, что люди вида *Homo sapiens sapiens* расселились на нашем континенте 35—40 тыс. лет назад и вскоре вытеснили неандертальцев, живших тут уже на протяжении сотен тысячелетий. О первом появлении в Европе людей современного типа ученые судили главным образом не по ископаемым остаткам, а косвенно — по костяным орудиям, оружию, ожерельям и другим предметам, отличавшимся большим совершенством, чем все, на что был способен неандерталец. Такие материальные свидетельства в Восточной Европе обычно датируются временем, отстоящим от нас на 40 тыс. лет и позже, но костные останки их изготовителей древнее 32 тыс. лет были редки, и время их захоронения называлось весьма приблизительно.

«Румынская челюсть», по мнению палеантрополога К.Стрингера (C.Stringer; Музей естественной истории в Лондоне), — самая ранняя и уверенно датированная принадлежность человеческой

особи современного типа. Другой видный эксперт — Р.Францискус (R.Franciscus; Университет штата Айова) подчеркнул, что называемый возраст находки — минимальный, возможно, она еще древнее. Тот факт, что палеантропологи познакомились ныне с особью, принадлежащей именно *H.s.sapiens*, доказывается строением челюсти. Однако некоторые ее архаичные черты (например, большие размеры зубов мудрости), по-видимому, как замечает Тринкаус, связывают их владельца с более примитивными людьми.

Таким образом, наш прямой предок 35 тыс. лет назад все еще продолжал эволюционировать и «окончательно современным» еще не был.

Science. 2003. V.300. №5621. P.894 (США).

Археология. Микробиология

Пещера Ласко в опасности

На юге Франции, недалеко от городка Монтиньяк, в 1940 г. была обнаружена пещера, получившая название Ласко (Ляско). Вскоре она приобрела всемирную известность: на ее стены около 15 тыс. лет назад человек нанес методом гравировки, моно- и полихромной росписи реалистические изображения диких лошадей, первобытных быков, оленей, горных козлов и других животных; есть и уникальный рисунок мужчины с птичьей головой, который лежит перед бизоном, вероятно, им убитым.

Ознакомиться с этим палеолитическим памятником на-

скального искусства ежедневно стекалось до тысячи человек. Однако в 1963 г. на сводах пещеры были замечены скопления зеленых водорослей, угрожавших существованию бесценной «картинной галереи», и она была закрыта для публики. Стены обрабатывали формальдегидом, и проблема оказалась решенной. Но в июне 2001 г. разразилась новая беда: установленный в пещере кондиционер стал причиной появления грибка *Fusarium solani*, который с пола постепенно перемещался на стены. Благодаря подобранным фунгицидам грибок начал было отмирать, но вскоре микробиологи обнаружили, что те же спасительные фунгициды пришлись по вкусу бактерии *Pseudomonas fluorescens*, которая охотно поедала всех врагов грибка. Пришлось в раствор для обработки стен добавлять антибиотики. Однако международная комиссия экспертов, созданная французским Министерством культуры и недавно закончившая свою работу, пришла к выводу: экологическое равновесие в пещере окончательно не достигнуто, грибки не оставляют ее в покое; необходимы дальнейшие исследования климатических, гидрологических, химических и биологических условий подземного пространства.

Опасаясь за сходную судьбу древнего художественного наследия, закрыли для посетителей и пещеру Альтамира¹ на севере Испании.

Science. 2003. V.300. №5617. P.245 (США).

¹ См. также: Как спасти древнюю живопись Альтамира // Природа. 1987. №11. С.116; Как спасти пещерные фрески? // Там же. 1994. №5. С.95.

Новая история «одного рода пресноводных полипов с руками в форме рогов»

член-корреспондент РАН В.В.Малахов

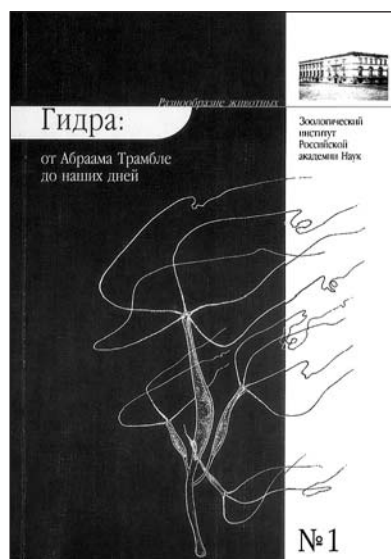
Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова

Зоологический институт РАН выступил с новой издательской инициативой: начата публикация серии книг «Разнообразие животных», в которых предполагается в популярной форме рассказать о наиболее известных или особенно интересных и важных представителях животного мира. Если удастся реализовать замысел, учителя биологии, руководители кружков юных натуралистов, студенты-биологи и многочисленные любители природы смогут поставить на свою книжную полку пару десятков книжек о различных животных: от простейших до млекопитающих.

Первая книжка серии увидела свет в конце 2003 г. Это настоящая монография, посвященная обыкновенной гидре, той самой, которую все «проходят» в школьном курсе зоологии. Гидра (зоологическая, а не мифологическая, с которой сражался Геракл) была открыта 300 лет назад. В 1703 г. в трудах Лондонского Королевского общества было опубликовано очередное письмо А.Левенгука, нашедшего на листочке водного растения в пруду близ голландского г.Делфта маленькое существо, которое втягивало и сокращало свое тельце, шевеля длинными «рогами». Левенгук описал множество чудесных «анималькул» — различных

мелких организмов, которых он обнаружил с помощью изобретенного им микроскопа. Среди прочих открытий очередная «анималькуля» не привлекала особого внимания до тех пор, пока в 1744 г. не был опубликован труд швейцарца А.Трамбле «Мемуары к истории одного рода пресноводных полипов с руками в форме рогов». Трамбле не только описал строение гидры (кстати, именно он впервые использовал известное из греческой мифологии имя «гидра» применительно к живому организму, хотя официальное латинское название *Hydra* было присвоено ему только в 1858 г. К.Линнеем), но также исследовал его питание, поведение и размножение. Трамбле осуществил блестящие по замыслу и технике опыты по регенерации и другим аспектам экспериментальной биологии гидры. Удивительно, но работы Трамбле были не просто замечены современниками, а пользовались громадным успехом, их обсуждали по всей Европе, отыскивали гидр и пытались воспроизводить эксперименты. С мемуаров Трамбле началась не только история изучения гидр, но и всей экспериментальной биологии.

Обо всем этом можно узнать, прочитав первую часть рецензируемой книги, а заинтересовавшись, отыскать в библиотеке и книгу самого Трамб-



С.Д.Степаньянц, В.Г.Кузнецова, Б.В.Анохин. ГИДРА: ОТ АБРААМА ТРАМБЛЕ ДО НАШИХ ДНЕЙ. Серия «Разнообразие животных». Вып.1.

М.; СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2003. 102 с.

ле — она была издана на русском языке*. Перевел ее с французского языка известный российский биолог и историк науки И.И.Канаев, которого столь заинтересовала гидра, что он спустя время сам написал блестящий очерк, посвященный биологии пресноводных полипов**. Безусловно, гидра привлекала внимание и многих других исследователей.

В новой книге, посвященной гидре, собраны известные и неизвестные ранее сведения по биологии гидр: их питанию, физиологии, размножению, симбионтам и паразитам и многому другому. Особенно ценны сведения по систематике этих организмов. Читатель узнает, сколько видов гидр обитает на территории нашей страны, и сможет их определить, воспользовавшись оригинальным ключом, созданным авторами книги.

Заключительная часть книги содержит некоторые современные сведения о кариологии гидр (хромосомных наборах различных видов), результатах применения иммунологических методов к изучению пресноводных полипов и даже новейшие данные по экспрессии генов, содержащих гомеобоксы. В этой части использованы оригиналь-

* *Трамбле А.* Мемуары к истории одного рода пресноводных полипов с руками в форме рогов / Пер. с фр. И.И.Канаева. М.; Л., 1937.

** *Канаев И.И.* Гидра. Очерки по биологии пресноводных полипов. М.; Л., 1952.

ные результаты авторов книги и отражены их собственные исследовательские интересы. Однако, к сожалению, в книге не нашлось места совсем не лишним (и даже очень полезным для учителей и студентов) сведениям по организации клеток и тканей гидр по данным современной электронной микроскопии. В литературе много прекрасных схем ультраструктурной организации эпителиально-мышечных клеток гидр, строению их чувствительных и нервных элементов, стрекательных и интерстициальных клеток. Такие схемы вполне можно было воспроизвести в популярной книжке, тем более что электронно-микроскопические схемы давно уже приводятся даже в школьных учебниках и были бы вполне понятны для читателей. Мне даже кажется, что такие сведения более важны для широкого круга читателей, чем ценные, но интересные только для специалистов данные по кариологии гидр.

Особняком стоит глава «Гены», написанная аспирантом Г.Гениховичем, который в общих чертах повторяет содержание предыдущих глав и порой скатывается на стиль, подходящий, скорее, для специальных публикаций: «Эти гены, например, HMP1, HMMP, FARM1 и др. (Yan et al., 1995; Leontovich et al., 2000; Kumpfmuller et al., 1999), принадлежат, в основном, к семейству металлопротеиназ матрикса...». Неужели об этом надо

было писать, да еще в такой наукообразной форме, в популярной книжке? А вот рассказать подробно, как содержать гидру в школьной или университетской лаборатории, было бы очень ценно. Гидра входит в число обязательных объектов зоологического практикума всех университетов и педвузов нашей страны, а везде ли ее показывают студентам живьем? В поддержании культуры гидр есть свои тонкости, и авторы, обладающие большим опытом в этом деле, могли бы и поделиться своими секретами.

В книге есть, конечно, и опечатки, и неточности (какое издание нынче обходится без них?!). Так, на с.16 перепутаны подписи под рисунками 6 и 7. На с.39 известные исследователи гидр К.Мак-Конел и И.И.Канаев отнесены к началу XIX в., хотя на самом деле они работали в XX в. Но все эти мелочи никак не умаляют главного: появление популярной книжки о гидре — замечательное событие. Такую книжку с удовольствием прочитают и учитель биологии, и его ученик — умный старшеклассник-натуралист; она будет интересна студенту-биологу и полезна профессору зоологии. Так что, поблагодарим авторов за их полезный и интересный труд и пожелаем Зоологическому институту поскорее приступить к выпуску других книг задуманной серии «Разнообразие животных». ■

Информатика

В.Н.Пильщиков. ЯЗЫК ПАСКАЛЬ: Упражнения и задачи. М.: Научный мир, 2003. 224 с.

Книга содержит много разнообразных упражнений и задач по языку программирования Паскаль. Сборник составлен с учетом многолетнего опыта проведения практиче-

ских занятий по программированию на факультете вычислительной математики и кибернетики МГУ им.М.В.Ломоносова. Это существенно переработанный и расширенный вариант задачника. Основное отличие — в увеличении числа упражнений, в которых в виде вопросов выделяются наиболее важные аспекты языка Паскаль. Каждый раздел сборника по-

священ одному из понятий языка, в конце приводятся задачи для самостоятельной работы.

Рассматриваемая версия языка Паскаль в целом соответствует международному стандарту. Но есть и некоторые изменения: не рассматриваются схемы параметров-массивов в списке формальных параметров и записи с вариантами, в то

же время в идентификаторах допускается использование русских букв.

Геофизика

ГЕОФИЗИКА XXI СТОЛЕТИЯ: 2002 год. Сборник трудов Четвертых геофизических чтений им. В. В. Федынского / Под ред. Л. Н. Солодилова. М.: Научный мир, 2003. 468 с.

Сборник включает доклады, представленные авторами на Четвертых ежегодных геофизических чтениях имени выдающегося российского ученого-геофизика, доктора физико-математических наук, профессора Всеволода Владимировича Федынского (1908—1978).

В 1929—1936 гг. Федынский руководил гравиметрическими экспедициями в Азербайджане, Дагестане, Поволжье, на Каспии. В 1957—1977 гг. возглавлял Управление геофизических работ в Министерстве геологии СССР, под его руководством была создана крупнейшая в нашей стране геофизическая служба. С 1967 г. и до конца жизни Всеволод Владимирович заведовал кафедрой геофизических методов исследования земной коры на геологическом факультете МГУ. Написанный им учебник «Разведочная геофизика» по сей день представляет большой интерес для специалистов.

Это второе издание подобного рода (первое вышло в 2001 г.), осуществленное Центром региональных геофизических и геоэкологических исследований Министерства природных ресурсов РФ, созданным при участии В. В. Федынского.

Неизменной осталась структура книги. Три раздела — «Особенности строения земной коры и верхней мантии по данным геофизических исследований», «Вопросы геодина-

мики и прогноза землетрясений», «Новые геолого-геофизические технологии и аппаратные разработки» — охватывают широкий круг научных и практических проблем, решаемых геофизикой. Среди авторов сборника — ученые из России, Азербайджана, Украины, Казахстана.

Археология

М. И. Ибрагимов. НАСКАЛЬНЫЕ РИСУНКИ ДАГЕСТАНА И КОЛЕБАНИЯ ПОЛЮСОВ И НАКЛОНА ОСИ ЗЕМЛИ В ГОЛОЦЕНЕ. Махачкала: Юпитер, 2003. 432 с.

Книга посвящена изучению всех известных в настоящее время наскальных рисунков Дагестана, которые служили древнейшими солнечными и лунными часами, использовались при составлении календарей и сооружении устройств для вычисления затмений светил.

Версия о календарном значении наскальных рисунков была высказана автором еще в начале 1990-х годов в книгах «Солнечные календари Кегерского нагорья» и «От Кегера до Стоунхенджа». В новой работе она изложена более подробно и убедительно. Способ оценки возраста наскальных рисунков и культовых сооружений был защищен патентом в 2001 г., хотя отнесение их к более древнему времени — 14 тыс. лет (часы) и 65 тыс. лет (календари) — пока не всеми признано.

В целом книга содержит много новых фактов. Найдены, например, наскальные рисунки с изображением древнейших часов, устройства для расчета затмений светил Дагестана; впервые описаны Табаранские, Варайские, Темирчинские, Верхнечириуртовские, Восточно- и Западнокап-

чугайские, Чумаульские, Кегерские, Кудалинские, Унтинские, Куппинские, Восточно- и Западноэкибулакские, Уйташские наскальные рисунки. Многие из них выполнены природными орами или же гравировкой на скалах. Даже современная техника не всегда позволяет скопировать их полностью.

История науки

Е. Л. Фейнберг. ЭПОХА И ЛИЧНОСТЬ. ФИЗИКИ. ОЧЕРКИ И ВОСПОМИНАНИЯ. 2-е изд. М.: Физматлит, 2003. 416 с.

Книга представляет собой собрание очерков, посвященных некоторым выдающимся отечественным физикам (Л. Д. Ландау, М. А. Леонтовичу, И. Е. Тамму, А. Д. Сахарову и др.), с которыми автор был в большей или меньшей степени близок на протяжении десятилетий, а также воспоминания о Н. Боре. Почти все они уже публиковались, однако открывшиеся архивы дали возможность существенно дополнить их. Статьи сборника объединяет проблема, вынесенная в название.

Новое издание отличается от предыдущего. Во-первых, добавлением двух новых очерков: обширного — о Л. И. Мандельштаме и краткого — о С. И. Вавилове. Во-вторых, существенно расширен очерк о В. Гейзенберге, в котором говорится и о приходе Гитлера к власти, и о провале немецкой «урановой проблемы». В последние годы в литературе высказываются резко противоположные оценки поведения Гейзенберга при нацистском режиме, часто осуждающие его. Точка зрения автора книги отличается от этих мнений людей, не переживших диктатуры.

Токарные художества Петра Великого

В конце номера

В.П.Борисов,

кандидат технических наук

Институт истории естествознания и техники им.С.И.Вавилова РАН

Москва

Одним из главных увлечений Петра I на протяжении всей его жизни была работа на токарных станках. По описанию современников, обычный день российского императора складывался следующим образом:

«Государь встает очень рано, так что в три и четыре часа утра присутствует в тайном совете. Потом идет на верфь, где смотрит за постройкой кораблей и даже сам работает, зная это мастерство превосходно. В девять или десять часов занимается токарной работой, в которой так искусен, что решительно ни одному художнику не уступит».

Токарные мастерские Петр I завел уже в конце XVII в. Одна из них, возглавляемая известным механиком Иоганном Блеером, располагалась в Сухаревой башне в Москве. В 1705 г. учеником к Блееру поступил 12-летний Андрей Нартов, которому предстояло в дальнейшем внести существенный вклад в развитие отечественной механики. Юный «мастер токарных и резных дел» вскоре попадает в поле зрения царя. В 1712 г. по именному указу Петра I А.К.Нартов был переведен из Москвы в Санкт-Петербург и определен токарем в мастерскую Его Величества при Летнем дворце.

Царская токарня, имевшая 27 станков для обработки слоновой кости, считалась в то время одной из лучших в Европе. К работе были привлечены профессионалы высокой квалификации: токарь-художник, механик и скульптор Франц Зингер был выпущен Петром из Италии, где немецкий мастер служил при дворе герцога Козимо III Медичи. Мастерами своего дела являлись Георг Занепенс из Англии (в России его называли Юрием Курносым), Андрей Коровин, Степан Яковлев. Следует отметить, что деятельность этих мастеров была связана с так называемым романтическим направлением в развитии токарных станков. Создаваемые ими «машины» предназначались главным образом для изготовления художественных изделий: медальонов, рельефных картинок, кубков, люстр и т.п. Процесс изготовления таких предметов начинался с создания копира из твердого материала (бронзы) с нанесенным на нем рельефным рисунком. Выполнение копира было наиболее творческой частью работы, требовавшей обычно не менее года труда квалифицированного мастера. С помощью станка можно было сделать по копиру любое количество копий медальонов или других художественных изделий, используя в качестве об-

рабатываемого материала кость, рог или дерево.

Работа на токарно-копировальных станках настолько вошла в привычку русского царя, что, отправляясь в поездки по Европе, Петр часто брал «машины» с собой. Изготовленные им в России медальоны, а иногда и сами станки, преподносились в качестве дипломатического подарка. Кубок и табакерка, выточенные из слоновой кости собственноручно Петром I, были подарены в 1718 г. королю Фридриху Вильгельму I. Кроме того, прусскому двору передали «медальерный» станок конструкции Нартова, личного токаря Петра I, получившего в конце жизни титул статского советника. «...У него в Берлине такой машины нет», — сообщал мастер.

Еще один токарно-копировальный станок для «медальерных» работ, изготовленный, по видимому, специально для несовершеннолетнего Людовика XV, был подарен Петром французскому двору в 1720 г. Станок сохранился и находится сейчас в Национальном музее искусств и ремесел в Париже.

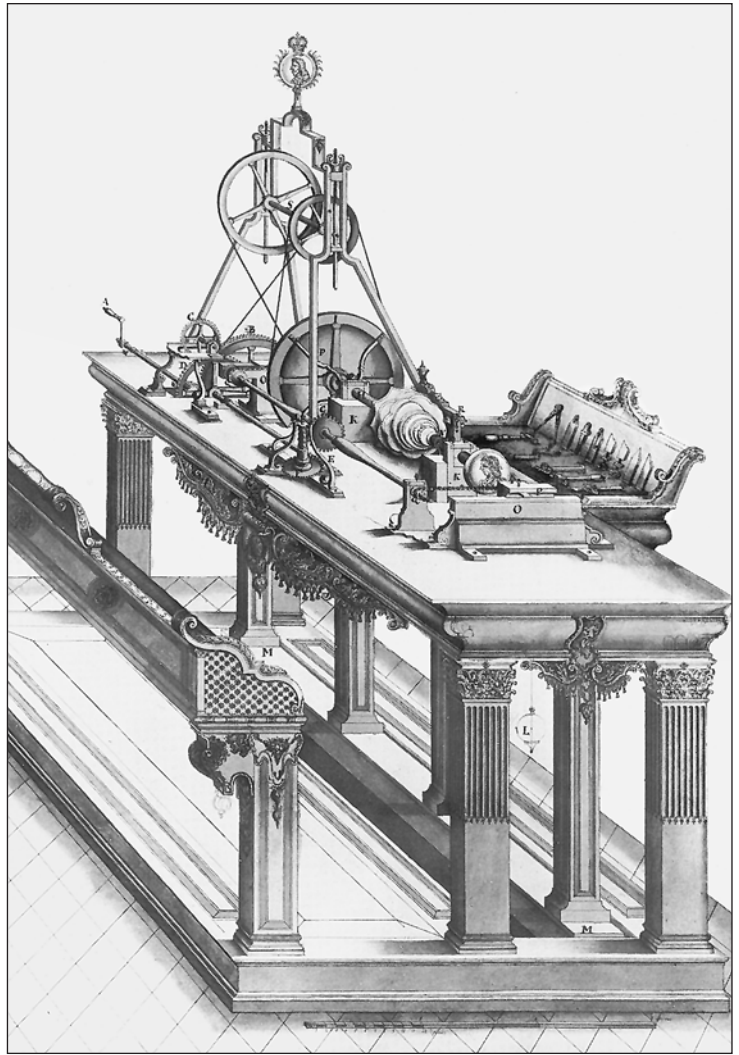
Токарно-копировальные станки разных конструкций, разработанные «царскими токарями» А.Нартовым, И.Блеером, Ф.Зингером, Г.Занепенсом, сохранились и в России. Эти стан-

© Борисов В.П., 2004



Андрей Константинович Нартов
(1693—1756).

«Персональная машина второго рода»,
или копировально-токарный станок
А.К.Нартова. Рисунок из рукописи
«Театрум Махинарум», 1755 г.



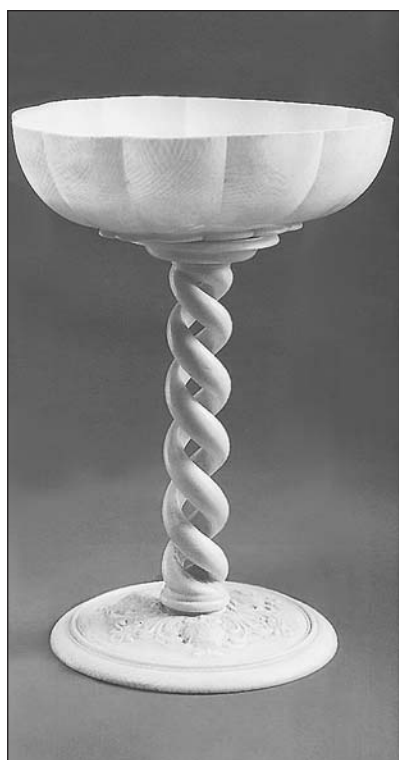
ки, так же как разнообразные изделия, изготовленные с их помощью, можно увидеть в Государственном Эрмитаже, Летнем дворце Петра I, Меншиковском дворце в Санкт-Петербурге.

В 1755 г., незадолго до своей смерти, Нартов закончил работу над книгой «Театрум Махинарум или ясное зрелище машин». В этой рукописи, над которой ее автор, русский механик трудился в течение двадцати лет, он подводил итог своим знаниям в области режущих станков. «Механика все прочие науки превосходит», — написал Нартов в предисловии. Описания разнообразных станков, таблицы с изображениями инструментов и уникальных художественных изделий, помещенные

на 104 листах рукописи, служат подтверждением этой мысли автора.

В начале 1990-х группа энтузиастов из Санкт-Петербурга задалась целью воссоздать наиболее интересные станки Нартова и восстановить утерянную технологию токарных художеств. Группа, работавшая при поддержке галереи «Петрополь», Государственного Эрмитажа и Российской академии наук, состояла из архитекторов-реставраторов, конструкторов, механиков, плотников, художников-скульпторов и токарей. Процесс восстановления механизма станков и воспроизведения технологий по изготовлению изделий из кости оказался достаточно сложным.

Первым объектом для воссоздания стал токарно-копировальный станок Нартова, изображение которого было в рукописи «Театрум Махинарум». Было решено воспроизвести по возможности точно как механическую часть станка, так и несущий его деревянный верстак со скамейкой. Согласно рисунку, деревянная часть украшалась богатым резным орнаментом, — красивый декор «махинового» пьедестала был непременным требованием царя Петра I. Следует упомянуть, что, проектируя свой станок, Нартов часто привлекал к сотрудничеству французского декоратора и резчика Николя Пино, находившегося тогда в России.



Ваза с овальной чашей и спиральной ножкой из кости. Чаша и ножка изготовлены на токарно-копировальных станках. Кость. Высота 21.7 см. Государственный Эрмитаж.



Медальон (модель) с рельефным изображением взятия Нарвы. Медь. Государственный Эрмитаж.

Определить размеры нартовского станка оказалось непросто, поскольку соотношение фасадных и «перспективных» размеров на рисунках не было известно. В конце концов, габариты пьедестала были установлены: высота — 105, длина — 127 и ширина — 145 см.

Воссоздание технологической части станка Нартова потребовало инженерного анализа чертежа, помещенного в рукописи. Русский мастер спроектировал свою «махину» таким образом, что обработка изделий могла выполняться двумя способами. В первом случае резец, действующий на торцевой поверхности, получал движение подачи непосредственно от «гильширного» (бокового) брон-



Медальон с портретом Петра I, выточенный на копировально-токарном медальерном станке. Кость. Диаметр 10.5 см. Государственный Эрмитаж.

зового копира. Вторая кинематическая схема позволяла вырезать рельеф на поверхности будущего медальона или другого изделия с уменьшением размера рисунка по отношению к копиру от 1:4 до 1:3. Такое соотношение объяснялось следующим: диаметр бронзовых копиров традиционно составлял 360 мм, а слоновая кость, на которую переносился рисунок, имела в поперечнике диаметр от 90 до 120 мм.

Работа по реконструкции токарно-копировального станка Нартова была проведена в период 1990—1993 гг. Спустя 270 лет станок воссоздали как уникальное по своим техническим параметрам и художественным достоинствам устройство.

Станок находится в настоящее время в Петропавловской крепости в Санкт-Петербурге.

Он в рабочем состоянии: можно вытачивать медальоны и другие художественные изделия так, как делали три столетия назад мастера прошлого. Художник и скульптор Валерия Мокеева позволяет гостям вращать рукоятку, приводящую станок в движение. Крутить ручку легко, хотя плотность и твердость обрабатываемого материала весьма высока. По цвету и текстуре материал выглядит, как слоновая кость.

Сегодня многие художественные изделия из кости создаются с использованием уникального, хотя и давно известного, ископаемого материала — бивня сибирского мамонта. Эти животные, водившиеся в большом количестве на территории нашей страны тысячи и миллионы лет назад, оставили большие «залежи» ископаемого бив-

ня в районах Таймыра, Чукотки, Якутии и Колымы. Наиболее известное кладбище мамонтов находится на р.Берелех в Северной Якутии: благодаря вечной мерзлоте бивни сохранились в прекрасном состоянии. Весной, в результате размыва слоев почвы, особенно по берегам рек, бивни появляются на поверхности, превращались в драгоценный материал для резьбы по кости. Присутствие в земле солей различных металлов придает бивням всевозможные оттенки — от коричнево-розового до зеленовато-синего. Более всего художниками ценятся сиренево-розовый и черный цвета.

Возможно, со временем резчики по кости получат в свое распоряжение искусственные материалы любых цветов, текстуры и плотности. ■

ПРИРОДА

Над номером работали

Ответственный секретарь
Е.А.КУДРЯШОВА

Научные редакторы
О.О.АСТАХОВА
Л.П.БЕЛЯНОВА
Е.Е.БУШУЕВА
М.Ю.ЗУБРЕВА
Г.В.КОРОТКЕВИЧ
К.Л.СОРОКИНА
Н.В.УЛЬЯНОВА
Н.В.УСПЕНСКАЯ
О.И.ШУТОВА

Художественный редактор
Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией
И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Младший редактор
Г.С.ДОРОХОВА

Перевод:
П.А.ХОМЯКОВ

Набор:
Е.Е.ЖУКОВА

Корректоры:
В.А.ЕРМОЛАЕВА
Е.А.ПИМЕНОВА

Графика, верстка:
Д.А.БРАГИН

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

Учредитель:
Российская академия наук,
президиум
Адрес издателя: 117997,
Москва, Профсоюзная, 90

Адрес редакции: 119991,
Москва, ГСП-1, Маро́новский пер., 26
Тел.: 238-24-56, 238-25-77
Факс: (095) 238-26-33
E-mail: priroda@naukaran.ru

Подписано в печать 13.05.2004
Формат 60×88 1/8
Бумага типографская №1,
офсетная печать, усл. печ. л. 10,32,
усл. кр.-отт. 67,8 тыс., уч.-изд. л. 12,2
Заказ 8456
Набрано и сверстано в редакции

Отпечатано в ППП типографии «Наука»
Академиздатцентра «Наука» РАН,
121099, Москва, Шубинский пер., 6